



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

연속재생형 미디어 필터에 의한 녹조 제거

Removal of Green Algae Using Continuous Regeneration

Media Filter

指導教授 金 仁 洙

2011年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

吳 廉 在

工學碩士 學位論文

연속재생형 미디어 필터에 의한 녹조 제거

Removal of Green Algae Using Continuous Regeneration

Media Filter

指導教授 金 仁 洙

2011年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

吳 廉 在

本 論文을 吳廉在의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 宋 永 彩 (印)

委 員 工學博士 金 仁 洙 (印)

委 員 工學博士 金 億 祚 (印)

2010年 12月 24日

韓國海洋大學校 大學院

목 차

목 차	I
List of Tables	III
List of Figures	IV
Abstract	VII
1. 서 론	1
1.1 국내외 기술동향	3
2. 문헌연구	5
2.1 여과의 개요	5
2.2 역세여과	8
2.3 여과이론의 수리학	11
2.4 입자 제거 기작	19
2.5 녹조발생 메커니즘	21
2.6 연속재생형 미디어 필터의 개념도	33
3. 실험장치 및 방법	34
3.1 실험장치	34
3.2 시료 및 운전조건	40

4. 실험결과 및 고찰	44
4.1 미디어의 물성 비교	44
4.2 미디어의 용출 특성 비교	46
4.3 미디어 필터의 여과 특성 분석	50
4.4 시작품의 여과 특성 분석	57
4.5 경제성 분석	63
5. 결 론	65
참고문헌	67



List of Tables

Table 2.1 Trophic states of lake (OECD)	23
Table 3.1 Specifications of pump	35
Table 3.2 Specifications of motor	35
Table 3.3 Algae regulation	41
Table 3.4 Analytical Method	42
Table 4.1 Characteristics of media	45
Table 4.2 Comparison of installation and operation costs for fiber filter and media filter	64



List of Figures

Fig. 2.1 Blue-green algae bloom in the lake	23
Fig. 2.2 Photograph of <i>Microcystis aeruginosa</i> Kutzing	26
Fig. 2.3 Photograph of <i>Oscillatoria terebriformis</i>	28
Fig. 2.4 Basic principle of media filter system	33
Fig. 3.1 Schematic diagram of Lab-scale media filter system	35
Fig. 3.2 Drawing of Lab-scale media filter	36
Fig. 3.3 Drawing of media inlet and cutting part	36
Fig. 3.4 Photograph of Lab-scale equipment	37
Fig. 3.5 Schematic diagram of Pilot plant media filter system	39
Fig. 3.6 Photograph of pilot plant equipment	39
Fig. 3.7 Photomicrograph of green algae in influent	41
Fig. 4.1 Leaching characteristics of coke with time	46
Fig. 4.2 Leaching characteristics of anthracite with time	47
Fig. 4.3 Leaching characteristics of sand with time	48
Fig. 4.4 Leaching characteristics of diatomaceous earth with time	49
Fig. 4.5 Change of the media filter pressure and flow rate upon thickness of sand in Lab-scale (S_d , diameter of sand = $200\mu\text{m}$)	51
Fig. 4.6 Change of the media filter pressure and flow rate upon thickness of sand in Lab-scale (S_d = $150\mu\text{m}$)	51

Fig. 4.7 Change of the media filter pressure and flow rate upon thickness of sand in Lab-scale ($S_d = 90\mu\text{m}$)	52
Fig. 4.8 Relationship between media filter flow rate and thickness of sand in Lab-scale	53
Fig. 4.9 Relationship between media filter pressure and thickness of sand in Lab-scale	53
Fig. 4.10 Removal efficiency for green algae with different media size and thickness of sand in Lab-scale (G_d , diameter of green algae = above $10\mu\text{m}$)	55
Fig. 4.11 Removal efficiency for green algae with different media size and thickness of sand in Lab-scale (G_d = below $10\mu\text{m}$)	56
Fig. 4.12 Relationship between media filter flow rate and thickness of sand in pilot plant	58
Fig. 4.13 Relationship between media filter pressure and thickness of sand in pilot plant	58
Fig. 4.14 Removal efficiency for green algae with different media size and thickness of sand in pilot plant	59
Fig. 4.15 Removal efficiency for green algae with different media regeneration speed in pilot plant	60

Fig. 4.16 Removal efficiency for green algae by adding flocculant in pilot plant (S_t , thickness of sand = 6cm)	62
Fig. 4.17 Removal efficiency for green algae by adding flocculant in pilot plant (S_t = 15cm)	62



Removal of Green Algae Using Continuous Regeneration Media Filter

Oh, yeom-jae

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of
Korea Maritime University

Abstract

Green algae phenomenon is occurring every year due to rapid industrialization and economic growth and it is causing damage to humans from degeneration of water quality and destruction of a water ecosystem. Physical, chemical, and biological technologies are developed and applied to the field in order to minimize damages coming from green algae, however, its removal efficiency is inadequate and problems about secondary contamination are rising as to be solved. A sand filtration method or a membrane filtration method is mostly used as a filtering system in a sewage treatment plant. The sand filtration method has demerits of complicated facility and difficult cleaning of sands compared to its low maintenance cost, and the membrane filtration method is more preferred than other filtration methods as it has stable water quality and high removal rate of protozoans, however, the price of membrane is high and a lifespan of filter decreases as backwashing period shortens due to frequent blockage. This research promoted a study about continuous

regeneration media filter in order to overcome these limitations and for more efficient removal of green algae and concentration. Basic experiments such as change in pressure and flux during vacuum filtration, physical property of media, and leaching characteristics were conducted to deduct the optimal design factor. A trial product was produced based on this and removal efficiency of green algae according to diameter of media, depth of media layer, regeneration speed, and insertion of coagulant was deducted and comparatively analyzed, and economic feasibility of a media filter was assessed by selecting a generally commercialized fiber filter as the comparison target. As a result, sand was selected as the best media and the most efficiency was shown when particle size is less than 1cm when 200 μm , 0.8cm when 150 μm , and 0.7cm when 90 μm through pressure and flux measurement according to depth of each diameter of media layer. In case of green algae filtration of less than 10 μm diameter considering stable margin in removal characteristics of green algae per diameter of media layer, it was assessed that less than average diameter 150 μm of media, over 15cm of media layer thickness, and vacuum pressure of 380mmHg are proper. It was proved that the optimal RPM is 15 and the optimal coagulant insertion amount is 40mg/ℓ in removal characteristics of green algae according to regeneration speed and insertion of coagulant. Installation cost of a media filter was calculated lower than a fiber filter as the media filter is more compact and requires less numbers of components compared to the fiber filter in economic feasibility assessment, and it is judged that economic feasibility of a media filter will be higher in a long run in the field as the cost required in operating the filter for about 1 year is calculated as about 7% of a fiber filter and about 67% when operated for 5 years.

1. 서 론

우리나라는 급속한 산업화와 경제성장으로 각종 오염물질의 양적인 증가로 자연환경은 자정능력의 한계치에 시달리고 있으며, 호소나 저수지 등 대부분의 담수에서 부영양화로 인해 매년 녹조현상이 발생함으로써 수질을 급격히 악화시키고 있다.^[1]

녹조가 발생하면 호기성 박테리아의 증가로 인하여 용존산소가 부족하게 되고 이에 따라 혐기성 박테리아의 증가로 황화수소와 메탄이 발생하여 심각한 냄새를 유발시킨다. 또한 정수처리 과정에서 여과지의 상부에 녹조 막을 형성하여 여과기능을 떨어뜨리며, 점액질을 띠고 있어 어류의 아가미를 덮어 질식사시키는 등 수생태계를 파괴시키는 문제점을 야기시킨다. 여름에 집중적으로 발생하는 조류인 남조류 중 일부는 독소를 함유하여 물놀이 시 피부접촉에 의한 피부염이나 물을 마셨을 경우에는 복통, 두통 등을 유발하는 것으로 알려져 있다.^[1]

녹조발생에 따른 피해를 최소화하기 위해 90년대부터 조류예보제를 실시하고 있으며, 조류발생 시에는 활성탄 주입, 오존처리 등으로 정수처리를 강화하고 있다. 또한, 녹조방지대책으로 성층파괴를 위한 심층폭기나 강제순환, 수심이 깊은 호소에서 영양염류 농도가 높은 심층수의 방류, 영양염류가 농축되어 있는 저질토 준설, 생물학적 제어, 황산동 살포, 가압부상방법을 이용한 조류제거사업, 수초재배섬 설치, 조류제거선 도입, 운영 및 퇴적물 영향조사 등이 있다.^[1]

최근 들어 조류제거에 관한 연구가 활발히 진행되어 여러 가지 물리적, 화학적, 생물학적 기술들이 개발되어 현장에 적용되고 있으나, 그 제거효율이 미비한 수준이며 2차적인 오염에 대한 문제점도 해결되어야 할

과제로 떠오르고 있다.

현재 하수처리장에서 사용되고 있는 여과시설은 모래여과방식 또는 하수의 고도처리가 가능한 막여과법을 주로 사용하고 있다. 모래여과방식의 경우 유지비용이 적다는 장점이 있지만 복잡한 설비를 필요로 하고 모래의 세척이 어렵다는 단점이 있고, 막여과법은 탁도 및 부유물질의 완벽한 제어로 안정된 수질을 얻을 수 있으며, 제거가 어려운 원생동물 등의 제거율이 높기 때문에 다른 여과법에 비해 선호하는 편이지만 막의 가격이 비싸고 잦은 막힘으로 인하여 역세주기가 짧아져 필터의 수명이 감소되는 치명적인 단점을 가지고 있다. 따라서 기존의 필터에서 나타나는 단점을 해결하고 2차적인 오염 없이 녹조를 제거할 수 있는 여과시스템의 개발이 필수적으로 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 막이 가지고 있는 제한요소를 극복하고 경제적이며 효과적인 녹조제거와 농축을 위한 연속재생형 미디어 필터를 고안하여, Lab scale 실험을 통한 최적설계인자 도출과 이를 바탕으로 시작품을 제작하여 미디어 입경, 미디어 층의 깊이, 재생속도, 응집제 투여 등에 따른 녹조제거 효과를 도출하여 비교분석하였다.

본 연구의 결과는 오폐수 처리장의 처리수 정화장치, 취수장이나 정수장에서 상수의 처리, 적조 발생 시 육상 축양장으로 유입되는 폐수의 처리 및 해수의 여과, 해수 담수화 시설의 전처리 장치, 선박의 밸러스트수 처리장치의 전처리 장치, 발전소 냉각수 여과 장치 등 기존의 여과장치가 사용되는 거의 모든 장소에 사용이 가능한 최적의 여과공정을 가능하게 하며, 특히 차세대 하수처리공법으로 각광을 받고 있는 Membrane Bioreactor(MBR) 공정의 분리막 대체공정으로 사용가능한 여과공정 개발에 기여할 것으로 기대된다.

1.1 국내외 기술동향

국내외적으로 호소의 녹조 제거 방법으로 가장 많은 연구가 이루어지는 부분은 물리적 처리와 생물학적 처리를 결합한 형태이다. 물리적 처리의 경우 멤브레인 공법을 위시한 여과 공정이나 부상분리공정 및 침전 등이 많이 연구되고 있으며, 생물학적 처리의 경우 수중에 산소를 공급하여, 호소내의 유기물질이나 오염물질이 생물분해 되도록 하는 방법이 주로 연구되고 있다. 그 대표적인 방법은 수면포기식 방법이며, 가압부상조를 이용하여 오염물질 제거와 산소 공급의 두 가지를 모두 이용하는 기술들도 현재 많이 사용되고 있는 추세이다.

여과에 관한 연구 중 가장 대표적인 분야가 막분리 기술이다. 국내와 선진국 간의 막분리 기술에 대한 격차는 수년 정도로 근소하게 추정되고 있다. 또한 설계 능력과 시공능력의 부재로 인하여 막분리 기술에 대한 연구가 조속히 필요한 실정으로 많은 기업과 대학에서 연구 중이며, 일부 기업의 경우 제품화에 성공하여 시판되고 있다. 특히 현재 국내에서 진행 중인 막분리에 관한 대부분의 연구는 한외여과막(Ultrafiltration Membrane, UF)이나 역삼투막(Reverse Osmosis Membrane, RO)에 대한 것이고, 일부에서 정밀여과막(Microfiltration Membrane, MF)과 나노여과막(Nanofiltration Membrane, NF)에 관하여 연구되고 있다. 그러나 막분리의 경우 설치비와 운전비가 고가여서 본 연구에서 목표로 하는 대규모의 녹조 제거에는 경제적이지 못하다.

국내에서 진행 중인 미디어 여과 시스템에 관한 연구는 급속여과나 완속여과의 범주에 속하는 것이 대부분이었다. 또한 대부분의 미디어 여과 장치가 필터 표면에 미디어를 부착시키고 여과한 후 미디어의 재생과정

에서는 메디아를 전부 탈착시켜 세척을 하는 공정으로 여과와 재생이 분리되어 장치가 재생 시에는 가동을 중지해야하는 단점을 가지고 있다.

현재 국내에서 가동 중인 오수처리장에서 절반 이상이 여과장치를 설치 운영 중에 있으므로 국내 시장규모만 봐도 0.2조 ~ 2조원 규모가 될 것으로 추정된다. 국내외적으로 여과장치에 대한 시장규모는 환경시설 중에서 단일 장치로는 가장 큰 시장이다. 최근의 추세로 볼 때 대부분의 하수처리장에서는 고도처리를 위해 막 분리 방법을 적용하고 있는 실정으로 막 분리 과정의 전처리장치로도 사용될 경우 충분한 타당성을 가질 수 있을 것으로 판단된다.



2. 문헌연구

2.1 여과의 개요

2.1.1 여과의 정의 및 종류

여과란 액체와 고체가 혼합된 물질을 입자의 크기 차이를 이용해 고액 분리 하는 것을 말한다.^[2] 일반적인 여과공정은 어떤 입경의 여재를 적당한 두께로 충전된 장치로 이루어진다.^[3] 여과장치는 유체의 종류와 고형물 입자의 크기, 형태 및 농도에 따라 적절한 형식의 것을 선택하는 것이 중요하며 또한 공정의 요구조건 즉 최소 허용 입자의 크기, 여과효율, 연속 운전여부 등에 따라서 여재의 종류, 여과면적, 역세척방법 등을 선정하여야만 최적의 운전성능과 경제성을 확보할 수 있다. 여과는 공정에 따라서 역삼투막을 비롯하여 NF, UF, MF, 그리고 전위차를 이용한 전기투석법 (Electrodialysis, ED) 등으로 나누어진다. 요즘은 낮은 압력을 이용하여 비용을 줄이는 방법으로 NF와 그 이하의 압력에서도 사용가능한 UF와 MF의 사용방법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^[4]

2.1.2 여재의 선정

1) 여재의 종류

여재의 종류에는 금속 스크린, 모래, 섬유질 등이 있다. 금속 스크린은 철망 형 및 편치 고정 형이 있으며, 응용범위가 넓다. 모래의 경우 천연 모래 및 인조 모래가 있으며, 중급의 수처리에 사용된다. 섬유질은 주로 카트리지 형으로 공급되며 아주 미세한 불순물의 여과에 사용된다.

2) 여재의 특성

① 여재의 강도

여재의 강도는 금속 스크린이 가장 강하고 그 다음으로 모래와 섬유질 순이며, 금속 스크린은 유체의 흐름이나 불순물 입자의 충격에 대해 내구성이 아주 우수하다. 모래의 경우 여재간의 충돌, 마모 등에 의한 손상으로 여과 효율이 나빠질 우려가 있으며, 섬유질은 섬유상이므로 강도가 아주 약하다. 따라서 반드시 전처리가 필요하며 여재 면적을 크게 하여 유속을 아주 느리게 해야 한다.

② 사용시간에 따른 성능의 변화

필터는 부착된 강한 오염물을 제거하기 위해 주기적으로 세정되어야 한다. 모래는 사용을 계속함에 따라 부착성이 강한 오염물이 잘 세정되지 않아서 오염도가 점점 증가하게 되며, 이에 따라 여과능력이 떨어지게 된다. 또한 여과와 역세척을 반복함에 따라서 모래 입자끼리의 충돌로 인해 마모가 발생하고 파손된 작은 모래 입자가 여과수와 함께 유출되어 공정 측의 오염을 증가 시킬 수도 있다. 즉 유지관리에 세심한 주

의를 요하며, 잘못된 경우에는 오히려 역효과를 낼 수도 있다. 섬유질은 카트리지 타입으로 역세척을 통한 재생이 효율적이지 못하므로 사용시간이 증가하면 급격히 저항이 증가하고 교체주기가 다른 재질의 여과매체에 비해 매우 짧은 단점을 가진다.

③ 유지비용

섬유 여과지의 유지관리는 비교적 간단하나 여재가 대개 1회용이므로 매우 고가이다. 모래 필터는 유지관리가 복잡하여 비용이 많이 들며 또한 오염도가 증가하면 화학세정을 하거나 1 ~ 2년마다 한 번씩 여재 전체를 교체해야 하는 단점이 있다.

금속 스크린의 경우 스테인리스 철망 형을 사용하므로 부식에 강하고 강도가 높아 여재 파손의 위험이 없으며, 반영구적으로 성능을 유지하므로, 유지비용이 거의 들지 않는다.

3) 여과의 메커니즘

금속 스크린 여과의 경우 오염물은 1차적으로 여과 공극의 크기에 의해 기계적으로 여과되며, 여과가 진행됨에 따라 여재면에 여과된 오염물에 의해 케이크 층을 형성하게 된다. 케이크 층이 형성된 후에는 여과 공극에 의한 여과 보다는 케이크를 통한 2차 여과작용이 이루어지며, 이때는 여과 공극 크기보다 훨씬 미세한 입자(공극의 1/5정도)까지 걸리게 된다. 이러한 2차 여과를 케이크 여과 효과라고 한다. 모래층 여과에서는 오염물이 모래층 사이의 틈새에 걸리거나 모래의 표면에 부착 되는 형태로 여과가 이루어지며, 여과효율은 모래 입자의 크기, 모양, 균일도 및 표면 거칠기에 따라 달라진다.

4) 여과속도 및 장치의 크기

여재를 통과하는 유속은 일반적인 모래층 여과의 경우 0.2 ~ 0.3 m/sec정도이며, 금속 스크린의 경우는 모래층 여과의 3 ~ 5배 정도이다. 모래층 여과는 여재 층의 깊이(0.5 ~ 1m)가 필요하므로 장치의 크기가 아주 커지는데 반해, 금속 스크린을 사용할 경우에는 장치가 훨씬 간단해진다. 모래층 여과에서 여과 유속을 빨리 하면, 여재층에 편류(Channeling)가 발생하여, 오염물이 여과되지 않고 배출될 수 있으므로 특히 주의해야 한다.

2.2 역세여과

여과공정에서 역세척은 가장 중요한 공정으로써 여과 중에 집적된 탁질을 제거하기 위한 공정이다. 여과 중 억류된 탁질은 여과가 진행될수록 여재간의 공극을 막아 손실수두를 발생시키며, 여과지의 능력을 넘어 계속 여과를 하는 경우에는 오히려 여상에 억류된 탁질이 누출되어 정수를 오염시키는 사고를 유발시킨다. 따라서 일정한 여과시간이 지나면 억류된 탁질을 제거해 주어야만 효율적인 여과를 계속할 수 있다. 역세척 효율에 영향을 미치는 기본적인 요소로는 역세척 속도, 여재의 크기, 형상 및 비중 그리고 원수의 수질 및 수온, 응집제의 사용 여부 등이 있으며, 이러한 요소들의 특성에 맞는 적절한 팽창률이 보장되어야 최대의 수류전단력을 유발하여 최적의 역세척 효율을 달성할 수 있다.^[5] 수류전단력(hydrodynamic shear forces)은 역세척의 주요 정화 메커니즘으로 여재의 표면에 부착된 탁질의 탈착에 관여하는 중요한 힘으로 알려져 있

으며, 효율적으로 여재층을 역세척 하려면 여재가 적정한 공급률을 유지하면서 최대한으로 큰 수류전단력을 얻고 적절한 역세척 속도로 여과지를 세척하여야만 한다.^[6] 역세방법으로는 물, 물과 연속적인 공기의 주입, 물과 간헐적인 공기의 주입 등 3가지 방식이 있다.^[7]

2.2.1 역세척 방식

1) 물역세척 방식

재래식 방식 또는 지간 역세척 방식 등이 있으며 이중 재래식 방식은 현재까지 물역세척 방식으로 널리 사용되어 왔으나 에너지 손실이 많고 운전을 위한 부속시설이 많은 점이 단점으로 지적되어 왔다. 이에 비하여 지간 역세척 방식은 재래식 방식의 에너지 및 설비 면에서의 단점을 보완한 방식으로 운전이 매우 간편한 장점을 가지고 있다.

① 재래식 방식

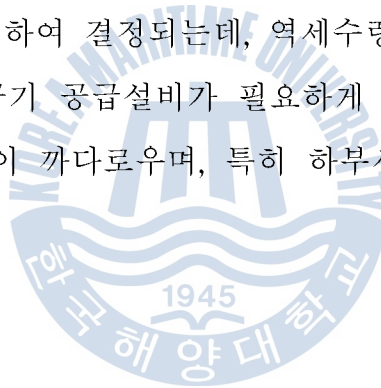
물만으로 또는 표면세척과 병행하여 역세척을 시행하여 여층내의 부착 탁질을 배출시키는 방식으로 역세척의 시기는 손실수두계에 의하여 시행된다. 역세수량을 공급하기 위하여 역세척 수조 또는 역세척 전용 펌프를 설치하여야 하며, 역세척 효율을 높이기 위하여 표면 세척장치가 추가로 필요하게 되는 등 유지보수 대상설비가 많아져 설치비용과 유지관리에 많은 비용과 노력이 든다.

② 지간 역세척 방식

재래식 방식과 동일하게 물만으로 작동하나 본 방식은 상수 처리의 경우 역세수량을 여과지 옆의 정수거에서 직접 공급받고 정수거 수위의 위치수두를 이용하게 되므로 재래식 방식에서의 역세척 수조나 역세척 전용펌프가 필요 없어 재래식 방식보다는 경제적인 장점이 있다.

2) 공기 + 물 역세척 방식

공기와 물을 조합하여 역세척을 시행하는 방식으로 상승기포의 미세진동을 이용하여 여층내에 부착된 탁질을 떨어뜨려 역세수와 함께 배출시키는 원리를 이용한다. 이 방식의 역세척 시기는 손실수두계 또는 레벨 스위치에 의하여 결정되는데, 역세수량이 물세척에 비하여 적게 소요되는 반면 공기 공급설비가 필요하게 된다. 공기와 물을 동시에 공급하므로 시공이 까다로우며, 특히 하부시설의 수평성, 수밀성이 유지되어야 한다.



2.3 여과이론의 수리학

2.3.1 여과의 수리학

충전층을 통한 흐름은 고전적인 수리학 이론으로 해석될 수 있는데, Carmen은 균일한 크기의 다공성 매체층의 조건에 영향을 미치는 파이프 내의 두 손실에 대한 Darcy-Weisbach 식을 변형시켰다. Carmen-Kozeny 식으로 알려진 결과식은 다음과 같다.^[8]

$$h_f = \frac{f' L (1-e) V_s^2}{e^3 g d_p} \text{-----}(1)$$

여기서 h_f = 균일한 크기 d_p 의 입자상을 통한 마찰손실(m)

L = 여과기의 깊이(m)

e = 상의 다공도

V_s = 여과속도(m/s)

g = 중력가속도(m/s^2)

d = 여과기 매체입자의 직경(m)

나머지 항인 f' 는 입자주위의 항력 계수와 관계된 마찰인자로 보통의 여과속도 범위인 층류에서는 다음과 같이 계산된다.

$$f' = \frac{150(1-e)}{Re} + 1.75 \text{-----}(2)$$

$$Re = Reynolds 수 = \frac{\Phi \rho_w V_s d}{\mu} \text{-----(3)}$$

ρ_w = 물의 밀도(kg/m³)

μ = 물의 점도(N·s/m²)

Φ = 형상인자로 대부분의 매체에서 0.75 ~ 0.85의 범위에 있다.

매체의 체 분석에 의하여 균일한 매체상에 대한 변형식은 다음과 같다. 매체의 체 분석에 의하여 인접해 있는 체 크기 사이의 무게분을 X_{ij} 를 구한다. 평균입자의 크기 d_{ij} 는 체 크기 사이의 중간이라고 가정한다. 체 크기 사이의 입자의 깊이는 X_{ij} 이라고 할 수 있다.

$$h_f = \left(\frac{L(1-e) V_s^2}{e^3 g} \right) \left(\sum \frac{f_{ij} X_{ij}}{d_{ij}} \right) \text{-----(4)}$$

2.3.2 역세척의 수리학

균등한 미디어로 이루어진 여상을 수리학적으로 팽창시키기 위해서는 수두손실이 유체 내에서의 입상미디어의 부유 질량과 같아야 한다. 수학적으로 이 관계식은 다음과 같다.^[8]

$$h = L_e(1 - \alpha_e) \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \text{-----}(5)$$

h = 여상을 팽창시키는데 필요한 수두손실(m)

L_e = 팽창여상의 깊이(m)

α_e = 팽창된 공극율(%)

ρ_s = 미디어의 밀도(kg/m³)

ρ_w = 물의 밀도(kg/m³)

상향류에 의해 생긴 저항력 때문에 각 입자들이 부유 상태로 있으므로, 침전이론으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_D A_P \rho_W \left(\frac{v^2}{2} \right) \Phi \alpha_e = (\rho_s - \rho_w) g v_P \text{-----}(6)$$

v = 역세척수의 상승속도(m/s)

$\Phi(\alpha_e)$ = 보정계수

실험 결과들로부터 팽창상(expandedbed)의 공극율은 레이놀즈수를 대략 1이라 가정할 때 다음 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$\Phi(a_e) = \left(\frac{v_s}{v}\right)^2 = \left(\frac{1}{a_e}\right)^9 \text{-----}(7)$$

그러므로

$$a_e = \left(\frac{v}{v_s}\right)^{0.22} \text{-----}(8)$$

또는

$$v = v_s a_e^{4.5} \text{-----}(9)$$

여기에서 v_s = 입자의 침강속도(m/s)

그러나 단위 면적당의 메디아의 부피가 일정하기 때문에 $(1 - a)L$ 은 $(1 - a_e)L_e$ 와 같다.

$$\frac{Le}{L} = \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha_e} = \frac{1 - \alpha}{1 - \frac{v}{v_e}^{0.22}} \text{-----}(10)$$

미디어가 증화된 경우에는 상층의 작은 입자들이 우선 팽창한다. 전체의 여상이 팽창하기 위해서는 역세척 속도가 가장 큰 입자를 들어 올릴 수 있을 만큼 충분히 커야 한다. 여상의 증화를 설명하기 위해서 체 안의 입자들이 균일하다고 가정하여 위의 식을 수정해야 한다.

$$\frac{L_e}{L} = (1 - \alpha) \sum \frac{\rho}{1 - \alpha_e} \text{-----}(11)$$

여기에서 $p\rho$ = 체 안에 있는 미디어의 비율

위의 식을 이용하면 필요한 역세척 속도와 팽창 깊이를 구할 수 있다.



2.3.3 케이크 여과의 수리학

케이크 여과란 여과조작이 여과매체 표면에 형성되는 입자층인 케이크에 의해서 행해지는 것을 말한다. 이러한 케이크 여과 현상의 분석에는 흔히 Darcy의 공식이라고 불리는 식을 사용한다.^[9]

$$v_D = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta \rho_c}{\mu \alpha_{av} w} \text{-----}(12)$$

V = 여과 단위 면적당 여액의 부피(m^3/m^2)

t = 여과시간(sec)

$\Delta \rho_c$ = 케이크 양쪽 면의 압력 차이(pa)

μ = 여액의 점도($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)

$\mu \alpha_{av}$ = 여과 평균 비저항(m/kg)

W = 여과 단위 면적당 케이크의 질량(kg/m^2)

위의 식은 케이크의 저항만을 고려해 준 식으로 단위 시간당 단위 면적당 여액의 부피, $v_0 = dV/dt$ 는 케이크의 공간을 통해 빠져 나오는 여액의 속도를 특정한 값이므로 케이크와 여과매체를 빠져 나온 후의 여액의 속도이다.

여과에 적용되는 전체 압력 $\Delta \rho$ 는 케이크에서의 저항과 여과매체에서의 저항을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\rho = \Delta\rho_c + \Delta\rho_m = \alpha_{av}W\mu v_D + R_m\mu v_D \text{-----}(13)$$

$$R_m = \text{여과매체의 저항(m-1)}$$

위의 v_0 d_p 대해 다시 정리하면 다음과 같다.

$$v_D = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta\rho_c}{\mu(\alpha_{av}W + R_m)} \text{-----}(14)$$

여과가 시작되는 순간에는 여과매체 위에 케이크가 형성되지 않았으므로 위의 식에서 단위 면적당 케이크의 질량 W 는 존재하지 않게 된다. 이 순간 이후 즉, 여과조작이 진행되는 기간에는 여과 단위 면적당 케이크의 질량 W 값이 증가함으로 이에 대한 물질수지를 단위 면적당 케이크의 질량으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{현탁액 전체의 질량} = \text{케이크의 질량} + \text{여액의 질량}$$

$$\frac{W}{S} = \frac{W}{S_c} + PV \text{-----}(15)$$

여기서, P 는 여액의 밀도 (kg/m^3), S 는 여과 대상 현탁액 내의 고체분율, S_c 는 여과 케이크 내의 고체분율이다. 이 식을 여과 단위 면적당 케이크의 질량, W 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$W = \frac{PS}{\frac{1-S}{S_c}} V \text{-----} (16)$$

$W = CV$ 라 정의하면 여액 부피당 형성되는 여과 케이크의 질량, C 는 다음과 같이 표현된다.

$$C = \frac{W}{V} = \frac{PS}{\frac{1-S}{S_c}} \text{-----} (17)$$

여과가 진행되는 동안 여액의 밀도 P 가 변화하는 경우는 드물므로 C 는 여과 대상 현탁액 내의 고체분율 S 와 케이크 내의 고체분율 S_c 에 의해 결정된다. 이 관계를 식 (14)에 대입하면 흔히 Ruth의 식이라고 부르는 식 (18)이 된다.^[9]

$$v_D = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta \rho_c}{\mu(\alpha_{av} CV + R_m)} \text{-----} (18)$$

이 식을 역으로 놓고 정리하면, 다음의 식이 된다.

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\Delta t}{\Delta V} = \frac{\mu \alpha_{av} C}{\Delta \rho} V + \frac{\mu}{\Delta \rho} R_m \text{-----} (19)$$

여과실험에서 $\frac{\mu \alpha_{av} C}{\Delta \rho}$ 와 점도 μ , C 그리고 여과 압력 값을 사용하여 여과 평균 비저항값 α_{av} 을 구할 수 있다.

2.4 입자 제거 기작

입자가 중력의 방향을 따라 포집자(고정층 미디어)를 중심으로 나타내는 여러 가지 궤적은 유체역학적작용(Hydrodynamic), 확산(Diffusion), 침전(Sedimentation), 관성력(Inertia)에 의한 부착(관성충돌), 차단(Interception) 등으로 나눌 수 있다. 이러한 메커니즘에 포집자의 크기가 상당한 영향을 미칠 것이다. 좀 더 구체적으로 묘사하면 탁질 입자의 이동과 부착과정에는 브라운 운동, 중력(관성충돌), 유체역학적 운동이 관여하고, 미디어 표면과 탁질 입자 또는 탁질 입자와 탁질 입자간의 인력에는 반데르발스 힘, 쿨롱인력, 화학적 결합력 등이 작용한다.^[10]

2.4.1 직접 여과 효과

직접 여과 효과란 유체 속에 들어있는 오염입자의 크기가 필터재질이 구성하고 있는 기공의 크기보다 커서 통과하지 못하고 필터에 걸리는 현상을 말한다.

2.4.2 관성 여과 효과

유체 속에 들어있는 오염입자가 유체와 같이 움직이다가 필터 미디어 앞에서 유체 흐름의 각도가 변함에 따라 유체를 따라가지 못하고 관성에 의해 직진을 계속하다가 필터 미디어에 걸리는 현상을 관성 여과 효과라 한다. 이런 효과는 유체가 액체이고 액체 속에 있는 오염입자의 밀도가 액체보다 높을 때 많이 발생하며, 흔히 물속에 침전되어 있는 모래나 파

이프 스케일 등에서 많이 발생하는 메커니즘이다.

2.4.3 확산 여과 효과

유체 속에 들어있는 오염입자가 크기도 아주 작고 가벼워서 실제 유체의 흐름선(Stream line)과 같이 따라 움직이지 못하고 유체의 입자들과 지속적으로 충돌하면서 유체의 흐름선을 벗어나려는 움직임(Micro Brownian Motion)에 의해 지그재그 모양으로 자유롭게 움직이는 확산 현상을 이용한 여과 방법이다. 이런 현상은 액체에서는 찾아보기가 힘들고 주로 기체에서 많이 나타나는 현상인데, 이 현상에 의하여 똑같은 필터라고 하더라도 액체인 경우와 기체인 경우의 여과 등급이 틀려진다.

2.4.4 포집입자 재통과 효과(Unloading)

유체 속에 포함된 오염입자가 위에서 설명한 효과들에 의해서 필터메디아에 포집되면 그냥 그 곳에 머무는 것이 아니라 다시 유체에 휩싸여서 필터메디아를 통과하여 나오는 현상을 포집입자 재통과 효과라 한다.

한번 포집 된 입자가 다시 유체에 휩쓸려서 유체 속으로 들어가는 이유는 몇 가지가 있는데, 예를 들면 유체의 유량이 증가해서 유속이 빨라지면 다시 유체에 휩쓸릴 수 있고 필터를 오래 쓰면 차압이 증가하게 되고 차압이 증가하면 기공이 넓어져서 빠져 나올 수 있으며, 펌프의 맥동 현상에 의해서 다시 나올 수도 있다. 잘 만들어진 좋은 필터는 필터메디아의 기공 크기보다 큰 입자가 통과되지 않으면서 입자를 포집 할 수 있는 기공을 많이 가지고 있어야 한다. 큰 입자가 하나도 통과되지 않으려

면 필터의 기공 크기가 압력이 높아지더라도 커지지 않고 필터메디아가 충분한 두께를 가지고 있어서 오염물의 대부분이 표면으로부터 20% 내의 층에 포집될 수 있도록 설계되어야 한다.

2.5 녹조발생 메커니즘

2.5.1 산소와 영양염

계절 변화에 따른 호소의 순환과 성층은 수중에 녹아 있는 용존산소와 영양염의 농도분포에 변화를 준다. 그래서 호소에 서식하고 있는 생물들도 이 변화에 의해 큰 영향을 받는다. 먼저, 수면부근의 물을 살펴보면 이른 봄의 순환기에 수중의 용존산소와 영양염류는 상하로 이동하여 잘 혼합된다. 표층의 수중에 사는 조류는 이 영양염을 사용하기 위해 광합성을 하여 증식을 계속한다. 영양염은 하층에 있는 물로부터의 순환에 의해 보충된다. 한편, 수온이 4°C 이상으로 올라가 물의 밀도차에 의해 층이 형성되기 시작하면, 물의 순환이 멈춘다. 그렇게 되면, 생물들은 표층수에 녹아있는 영양염을 사용하기 때문에 하층의 물로부터 영양염이 공급되지 않아 영양염의 부족을 가져오게 된다. 그 이상으로 온도가 올라가지만 동물플랑크톤이 조류를 왕성하게 먹게 된다. 이 때문에 여름의 성층기 호소는 수온이 높고, 조류활동이 쉽지만, 봄에 비해 조류의 생체량은 저하되게 되고, 호소의 투명도는 높게 된다.

호소 중에 유기물이 많이 포함되어 있는 중영양호 및 부영양호에서는 빛이 도달되지 않은 저층에서 유기물의 분해가 진행되고, 이 과정에 수

중의 산소가 소비된다. 물의 순환이 일어나지 않는 성층 시에는 상층의 물로부터 용존산소가 보충되지 않기 때문에 결국 분해가 진행되어, 산소의 부족을 야기한다. 특히 저층의 산소가 제로가 되면, 저니층에서 불활성하게 되거나 인이 환원되어 수중으로 인산염 인 등으로 용출된다. 수온이 낮은 가을에 다시 호소가 순환되기 시작하면 저층에 모여 있던 영양염은 표층으로, 용존산소는 저층으로 공급되게 된다. 그렇지만, 수심이 낮은 10m 정도 에서 수중의 환경은 이와는 완전히 다르다.

호소에 부는 바람의 영향을 크게 받고 수심이 깊은 호소에서는 호소가 성층 구조를 만드는 여름에도 물은 빈번하게 혼합하게 된다. 호소에서 바람이 심한 장소에서는 풍속 5m를 넘는 바람이 종종 불어와 간단하게 수심 2 ~ 3m 부근까지 혼합된다. 그러나 바람이 멈추면, 여름에는 순간적으로 온도차에 의해 물이 성층구조가 된다. 즉 물은 다시 혼합을 멈추며, 유기물의 분해가 진행되고 있는 호소의 저층 부근에서는 산소가 없어지고 인산인이 용출된다. 바람이 불면 물은 재혼합 되어 저층에 있던 영양염을 표층으로 올려준다. 또한 수심이 얕은 호소는 깊은 호소와는 다르게 수온이 높은 여름에 조류가 활발하게 증식하고 수중에 대량으로 존재하게 된다.

호소는 수중의 총질소와 총인 농도, 엽록소a의 농도 등에 따라 극빈영양, 빈영양, 중영양, 부영양, 과영양으로 분류되고 있다.^[11]

Table 2.1 Trophic states of lake (OECD)

Classification	ITEM				
	Annual average TP (mg/m ³)	Annual average Polished floors Chlorophyll - a (mg/m ³)	Maximum years Chlorophyll - a (mg/m ³)	Annual average Transparency (m)	Minimum years Transparency (m)
Extreme oligotrophy	< 4.0	< 1.0	< 2.5	< 12.0	< 6.0
Oligotrophy	< 10.0	< 2.5	< 8.0	< 6.0	< 3.0
Mesotrophy	10~35	2.5~8	8~25	6~3	3~1.5
Eutrophy	35~100	8~25	25~75	3~1.5	1.5~0.7
Hypertrophy	< 100	< 25	< 75	< 1.5	< 0.7

2.5.2 조류번성(Algae bloom)

조류번성이란 조류와 유사한 어떤 여러 종의 남조세균이 대량으로 발생하여 호소나 연못의 표면에 청색가루를 뿌려 놓은 상태가 된 것, 또는 대량으로 발생한 남조세균의 군집을 조류번성이라고 부른다.

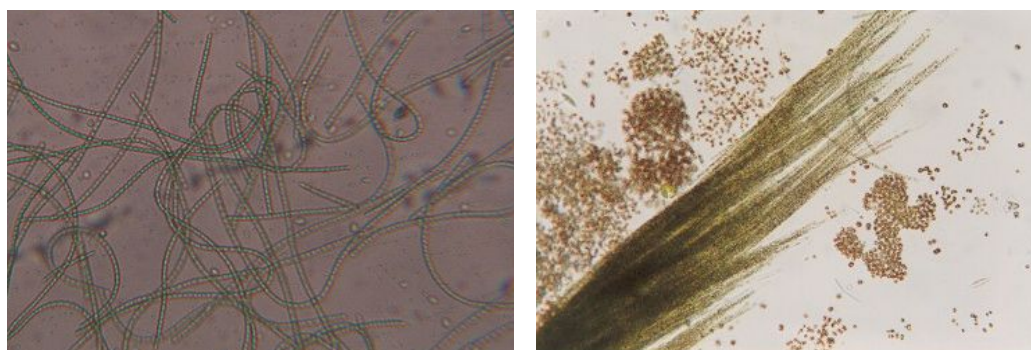


Fig. 2.1 Blue-green algae bloom in the lake
(Left : *Anabaena* sp. Right : *Aphanizomenon* sp.)

조류번성을 형성하는 남조세균은 수심 중 이상이라고 되어 있지만, *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria* 등의 속들이 대표적이고, 조류번성을 이렇게 속명으로 직접 부르는 경우도 있다. 조류번성 현상이 있는 호소의 공통적인 특징은 호소의 영양수준이 높고, 평균적으로 수심이 13 ~ 15m 이하로 낮고 대개 잘 혼합되는 호소로 밝혀졌다.

*Microcystis*가 조류번성 현상을 만드는 호소는 대개 총인 농도가 80 mg/m³인 부 또는 과영양호이다. *Anabaena*가 조류번성 현상을 만드는 호소의 총인 농도는 그것보다도 낮지만 역시 부영양호이다. 따라서 호소의 질소와 인의 농도가 어떤 수준을 넘으며, 수심이 얇고 잘 혼합되는 호소는 조류번성이 대량 발생할 위험성이 있다고 말할 수 있다.

조류는 수중의 질소와 인 그 밖의 무기영양염을 흡수하며 광합성에 의해 수중의 탄소를 고정하고 증식을 한다. 호소에 잘 나타나는 조류로는 남조세균류(남세균), 규조류, 크립토조류, 와편모조류, 황생편모조류, 녹조류 및 유글레나 조류로 분류된다. 크기는 0.6 μ m부터 수 mm에 가까운 다양한 폭을 갖는다.

조류의 채집에 사용되는 플랑크톤 네트의 망의 크기는 보통 40 ~ 90 μ m이기 때문에 대형 조류 밖에 채집할 수가 없다. 따라서 소형 종을 관찰하려면 물을 조용히 방치하고 침전을 가하여 상층액을 버린 후 현미경으로 찾아야 한다. 그러나 2 ~ 3 μ m 이하의 아주 작은 소형 조류는 형광 현미경으로 확인하지 않으면 안된다. 또한 조류라고 해도 동물처럼 편모를 갖고 있어 헤엄치고 다니는 것들도 많으며, 이런 것들은 자연 침전을 가해도 쉽게 침전되지 않기 때문에 보기가 어렵다. 따라서 조류의 생태를 연구하는 전문가에 있어서도 어떤 호소에 있는 조류 전체를 동정하고 정량하는 기본적인 일은 대단히 힘든 작업이다. 조류는 크기만이 아니고

여러 가지 형태, 색 그리고 서로 다른 기능을 갖고 있다.

조류번성의 주요 그룹은 남조와 규조가 대부분이다. 화석 연구에 의하면, 현재의 남조세균은 조류 중에서도 매우 원시적인 그룹으로 형태적으로 크게 4가지 타입으로 구분되는데 이들 모두가 조류번성에 참여하고 있다. 이러한 형태의 차이는 조류의 생리 생태적 특징을 암시하고 있다. 한마디로 조류번성이라고 말해도 그 조류번성이 어떠한 종류로 구성되어 있느냐에 따라 그 기능도 성질도 약간씩 다르다. 물론 한 종류로부터 만들어진 경우도 있지만, 복수의 종류가 혼합해 있는 경우도 있다. 심지어 같은 녹색으로 보이는 조류번성에서도 계정 도중에 종이 변할 수도 있다.

조류번성에는 다른 조류가 갖지 않는 특수한 능력이 있다. 첫째로 수중에 녹아 있는 질소가스를 직접 고정하는 능력이고, 다른 하나는 기포를 갖고 있어 수중에서 뜨고 내리는 것을 조절하는 능력이다. 조류는 영양물질원으로써 질소를 보통 수중의 암모니아와 NO_3^- , $\text{CO}(\text{NH}_4)_2$ 의 형태로 이용한다. 그 중에는 저분자 아미노산을 직접 이용할 수 있는 것도 있다. 한편 남조세균 중에는 분자상의 질소를 고정하는 것이 가능한 종류가 있다. 질소 소정은 산소를 싫어하는 혐기적인 과정으로 산소 발생형의 광합성을 하는 보통의 영양세포 내에서는 되지 않고, 이질세포라고 부르는 분화된 세포에서 가능하다. 그리고 어느 정도의 조류번성 형성종이 이질세포를 만들 수 있는 능력을 갖고 있다. 이런 이질세포를 형성하는 능력을 갖고 있는 남조세균을 실험실에서 질소원(암모니아와 NO_3^-)을 주어 생육시키면 이질세포는 만들어지지 않는다. 그러나 배양액으로부터 질소원을 없애고 생육시키면 전세포의 약 5 ~ 10%가 이질세포로 된다. 그 때문에 이러한 남조세균은 질소염이 결핍된 수역이나 호소 중에 인에

대한 질소의 비가 낮은 수역에서 유리하게 증식할 수가 있다. 그리고 하수 등이 대량으로 유입되는 호소에서는 대개 질소 대 인의 비가 낮은 것으로 알려져 있다.

조류는 주로 물이 혼합되는 수중에 떠다니고 있다. 대개 조류 종은 물보다 비중이 크기 때문에 보통 물 바닥으로 가라앉는다. 따라서 살아 있는 동안은 빛이 도달되는 장소에 멈춘 것처럼 여러 가지 형태로 살아가고 있다. 조류번성을 형성하는 종은 틀림없이 세포내에 가스주머니를 가지며 물에 뜨는 것이 가능하다. 기포는 대기가 충만한 기포라 불리는 여러 개의 작은 주머니의 집합체이다. 이 가스 소포는 세포가 성장하는 과정에서 세포내에 형성되어 일단 파괴되면 재생되지 않는다. 조류번성을 형성하는 종은 이 기포를 교묘하게 사용하여 단순히 물 표면에 뜨는 정도만이 아니고 세포의 대사 활성에 최적한 수심을 지정할 수가 있는 것처럼 세포의 침강과 부상을 조정하기 위한 기능을 갖는다.

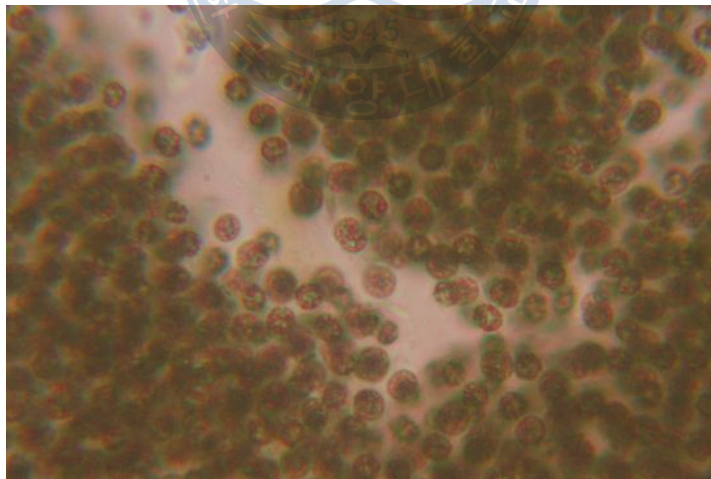


Fig. 2.2 Photograph of *Microcystis aeruginosa* Kutzing

2.5.3 빛의 영향 및 부상

강한 빛 아래에 세포를 두면 세포는 광합성을 활발히 하고 분열하며 증식한다. 세포분열의 속도와 기포의 생성속도는 서로 독립적으로 일어나고 세포분열의 속도가 기포의 형성속도를 증가한다. 그 때문에 가스 소포가 희석되고 물에 비해 상대적으로 무겁게 된다. 혹은 광합성의 산물인 탄수화물의 축적에 의해 세포밀도가 증가한다. 특히 탄수화물의 축적이 간접적으로 세포내의 압력(팽압)을 넘어 압력에 약한 기포를 파괴시킨다. 이러한 과정을 거쳐서 세포는 수중으로 침강되며, 침강된 세포는 빛을 받을 수 없게 되어 광합성을 하지 못한다. 이렇게 되면 이들은 호흡에 의해 탄수화물을 소비하고 세포의 밀도는 감소하며 특히 이들이 간접적으로 세포의 팽압을 낮춘다. 또한 세포 분열이 광합성과 비슷하게 되는 경우 세포의 분열이 일어나지 않고 기포의 생성만이 일어나 상대적으로 가볍게 된다. 이러한 여러 가지 과정의 결과로써 세포가 부상한다. 부상과 침전의 조정에 기여하고 있는 요소는 남조세균 종에 따라 큰 차이가 있다. 예를 들면 *Anabaena*의 한 종은 약한 빛 아래에서는 부상하지만 강한 빛 아래로 이동하면 약 한 시간 이내에 뜨는 것이 상실된다. 이것은 활발한 광합성으로 생성된 탄수화물의 축적이나 칼륨이온의 흡수가 세포팽압을 0.1MPa(약 1기압) 올리고, 그 결과 일부의 기포가 파괴되기 때문이다. *Microcystis*에서는 낮은 광량부터 높은 광량으로 옮기면 세포내 팽압은 0.27부터 0.35MPa로 상승하지만, 이 팽압의 증가는 가스 소포를 파괴하는데 충분치 않다. 그러나 광합성의 산물인 글리코겐 함량이 단 시간에 크게 변화시켜 부상과 침강을 결정한다. 실모양의 *Oscillatoria*의 어떤 종은 성충을 이룬 호소의 중층 특히 수온 약층에 모

여드는 특성을 갖는다. 대부분 이런 종은 느리게 부상하거나 하강하는 것으로 알려지고 있으며, 주로 광합성에 의한 세포분열이 기포의 생성을 상회하면, 기포가 희석되어 천천히 하강하지만, 영양염의 공급이 있고, 광부 족으로 광합성이 충분하지 못하면 기포가 합성되어 결국 위로 이동되게 되는 것으로 설명된다. 특히 영양염이 부족하다면, 기포는 생성되지 않기 때문에 세포는 쉽게 침강한다. 또한 탄소가 부족하면, 탄수화물이 합성되지 않기 때문에 침강을 저해하기 위해 움직인다고 말하고 있다.

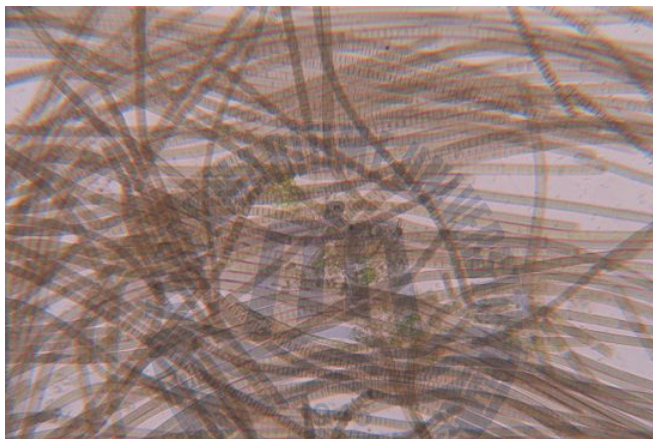


Fig. 2.3 Photograph of *Oscillatoria terebriformis*

2.5.4 먹이와 빛

깊은 호소의 환경은 계절 단위로 얕은 호소의 환경은 일 단위로 크게 변화한다. 특히 호소는 수직방향으로 광의 강도, 광의 파장, 수온, 영양염의 농도 등이 차이 나는 불균일한 공간을 구성하고 있다. 조류는 분열속도가 빠르기 때문에, 이런 단시간의 환경변화에 민감하게 대응하고, 시간과 장소에 최대로 적응된 종류가 증식한다. 이러한 호소 환경의 복잡성

이 서식하는 조류의 다양성을 크게 한다고 말하고 있다. 조류번성이 대발생하는 요인을 생각하기 전에 일반적으로 어떤 종의 조류가 우점적으로 번식하는지 요인에 대해 살펴보면, 동일한 시간과 동일한 공간에 서식하는 비슷한 조류 종은 광과 수중에 포함된 영양염 등 공통의 자원을 필요로 한다. 그 때문에 부족한 상황에서 자원을 얻기 위한 경쟁이 일어나고 그것을 유효하게 이용한 종류가 남고, 그렇지 못한 종은 소멸한다. 조류는 질소, 인, 규소 또는 철 등의 미량금속 등 복수의 필수 영양염을 필요로 하며 종 등에 최적한 영양염 공급량의 비가 다르다. 그 때문에 우점 하는 조류의 종류는 차이가 나고, 동시에 균형적으로 자원이 공급되는 환경에서는 복수 종이 공존할 수 있다.

조류가 광합성에 의해 고정되는 탄소량은 저광량력에서는 광량의 수에 비례하여 증가하지만(흡수된 1광량자당 이산화탄소의 고정량을 양자수율이라 한다), 대략 수면 바로 밑에 광량의 오분의 일부터 십분의 일의 광량 이상이 되면 포화된다. 역으로 강한 빛 하에서는 강한 광저해나 광호흡이 일어나는 실질의 순광합성 양이 감소하는 것으로 알려져 있다. 빛의 광도와 파장에 대한 조류의 반응은 종에 따라 또는 생리조건에 의해서도 다르다. 예를 들면 규조는 음엽형 광합성을 하고 약한 빛 아래서 유리하게 서식한다. 역으로 녹조는 양엽형으로 강한 빛 아래서 유리하게 생육한다는 것이 알려져 있다. 빛이 부족하지 않은 조류는 광합성 색소의 함량을 올리거나 양자수율을 올리는 것도 일반적으로 알려져 있다.

수중에서 빛은 지수적으로 감쇄한다. 수면 바로 밑에는 자외선 등도 많기 때문에 보통 호소 조류의 수직분포를 조사하면 수면 바로 밑보다 더 아래쪽에 현존량이 크게 된다. 성층기의 표층에서는 빛은 충분하지만

영양염이 부족하다. 그리고 수온약층 부근에는 영양염이 충분하지만 빛이 부족한 환경이 된다. 이러한 경우도 공급된 광량과 영양염의 균형으로 우점 하는 조류종이 변화한다고 말하고 있다. 또한 조류는 각 분류군이 고유의 보조색소를 갖고 이용하는 빛이 파장이 다르다. 표층에 우점하는 조류나 수중에 분산된 미립자에 의해 거기에 흡수되는 빛의 파장이 다르기 때문에 그 밑에 도달하는 파장도 당연히 변화된다. 단순히 빛량만은 아니고 빛의 질 변화도 우점종을 결정하는 중요한 요인이 된다. 과영양호 에서는 수온이 낮은 겨울을 제외한다면, 질소나 인이 아니고 빛이 확실하게 호소의 일차생산량을 제한하는 요인이 된다. 그 때문에 많은 조류 종은 빛을 모으기 위해 다양한 생활전략을 강구하고 있다.

2.5.5 조류변성 요인

영양염, 빛 등의 자원 이외에 조류의 서식을 위해 중요하다고 생각되고 있는 요인은 수온, 호소의 혼합도 및 동물플랑크톤에 의한 포식 등이다. 먼저 수온에 대해서는 조류의 종류와 마찬가지로 성장에 대한 수온의 폭이 다르다. 이것은 배양실험에서 확인할 수 있다. 예로서 *Microcystis*에 대해서는 30 ~ 35℃, *Anabaena* 25℃, *Oscillatoria*은 23 ~ 25℃이며, 혼합되는 수중에서만 증식하는 조류도 알려지고 있다. 규조의 *Aulacoseira* 속은 무겁고 규산질의 골격을 갖고 있어 침강이 쉽고, 순환기 같은 호소가 잘 혼합되는 시기에는 증식하지만 순환이 없는 시기에는 저층부근에 휴면포자로 있다는 것이 알려져 있다.

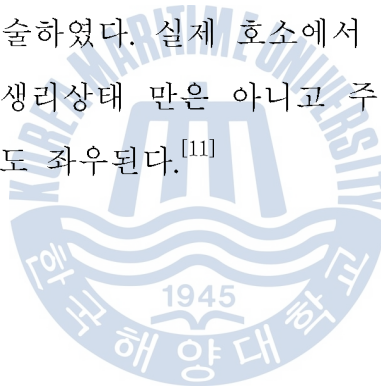
동물플랑크톤에 의한 섭식은 조류의 양이나 질을 좌우하는 중요한 요인이다. 동물플랑크톤의 여러 종류는 작은 먹이를 물과 같이 넣어 걸러

나누는 여과에 의해 섭식한다. 예로써 *Daphnia*의 그룹들은 가슴 부근에 있는 흉각으로 수류를 일으켜 먹이를 모은다. 흉각에는 가는 철판의 구조가 있으며, 특히 이절에 $0.5 \sim 2\mu\text{m}$ 간격으로 강모가 나와 있고, 이들에 박혀 있는 박테리아와 조류를 여과시켜 먹는다. 종에 따라 이용하는 먹이의 크기 폭의 차이가 나므로 우점 하는 동물플랑크톤의 종류에 의해 조류로의 영향이 다르다. 특히 지각류의 *Daphnia* 속은 먹을 수 있는 먹이 크기의 폭이 넓고, 동시에 여과속도가 크다. 이 속은 고밀도로 서식하는 수역에서는 조류를 급속히 먹어치워 투명도가 올라가는 것으로 알려져 있다. 조류는 크기에 의해 대형플랑크톤 ($200\mu\text{m}$ 이상), 극미플랑크톤 ($20 \sim 200\mu\text{m}$), 미소플랑크톤 ($2 \sim 20\mu\text{m}$), 극미소플랑크톤($2\mu\text{m}$ 이하)로 나누고 있다. 이것은 플랑크톤 군집의 구조와 기능을 파악하는데 크기를 이용하는 것이 편리하기 때문이다. 일반적으로 소형 종은 표면적을 체적으로 나눈 수치가 크다. 요컨대 단위체적당 영양염의 흡수 속도가 높고 증식 속도가 빠르다. 또한 소형 종일수록 뜨기 쉽지만 동물플랑크톤에 잡아먹히기도 쉽다. 대형 종은 그와 정반대다. *Microcystis*는 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 의 세포가 모여서 군체를 형성하고 있기 때문에 생리적으로 소형 종의 이점을 가지고 있는 동시에 대형 종의 이점을 함께 가지고 있다.

조류종의 우점성은 어느 정도의 요인에 의해서 결정된다는 것을 기술하였다. 그러나 전부의 조류종이 조류번성처럼 대발생하는 것은 아니다. 일정한 시기와 면적에 증가하는 조류의 양은 다음과 같이 계산된다. 조류세포로 만들어지는 양으로부터 그 밖의 세균이나 바이러스 등에 의해 분해된 양을 뺀 양이다. 조류의 수와 양이 대단히 높은 것은 증식속도가 빠르고 마이너스적으로 움직이는 요인이 적다고 생각해도 좋다. 또한 역으로 수나 양이 감소되는 것은 증식속도보다 마이너스적으로 움직이는

속도가 상회한다는 것이다.

먼저 플러스로 움직이는 요인에 대해서 살펴보면, *Microcystis*가 빛을 유효하게 이용하여 광합성을 하고 있다는 것은 앞에서 기술하였다. *Microcystis*의 광합성 곡선을 조사하면, 양자흡수율이 높고 강한 빛 저해가 나타나지 않는 특징이 관찰된다. 요컨대 낮은 광양역이나 높은 광양역에서도 광합성속도가 높고, 양엽형의 이점과 음엽형의 이점을 합해서 광합성을 한다. *Microcystis*의 최대 광합성속도는 수온의 지수관계로서 나타낼 수 있다. 실제 30 ~ 35℃ 라는 온도에서도 활발하게 증식한다. 고온에서의 광합성속도는 다른 조류의 보고에 비교하여도 높은 편이다. *Microcystis*의 주 광합성산물인 탄수화물의 축적에 의해 침강 부상한다는 것은 앞에서 기술하였다. 실제 호소에서 조류번성 구성종의 침강과 부상은 종 특유의 생리상태 만은 아니고 주변의 영양염 농도와 빛, 바람 등의 물리 환경에도 좌우된다.^[11]



2.6 연속재생형 미디어 필터의 개념도

본 실험에서 구현하려는 미디어 필터의 작동원리는 Fig. 2.4와 같다. 주요 작동 부위로는 미디어 유입부, 미디어 필터본체, 미디어 절삭부, 미디어 이송 및 재생부로 나눌 수 있다. 미디어 필터는 회전식 드럼의 외형을 가지고 있으며 가운데 축의 겉 표면을 미디어가 둘러싸면서 필터 역할을 수행한다. 원수가 유입되면 필터 표면에 부유물질이 케이크를 형성하여 막힘 현상이 발생하기 시작하고 이를 극복하기 위해 아래쪽의 칼날이 회전하는 필터 표면의 부유 고형물질을 미디어와 함께 절삭하게 된다. 절삭되어 떨어진 미디어와 부유 고형물질은 포집되어 유입부 상단으로 이송되면서 비중차에 의한 중력분리가 된다. 이때 미디어는 진공에 의해 필터 표면에 순간부착 되어 미디어가 교체되면서 여과면이 재생되고 부유 고형물질은 본체 하부로 떨어져 농축된다.

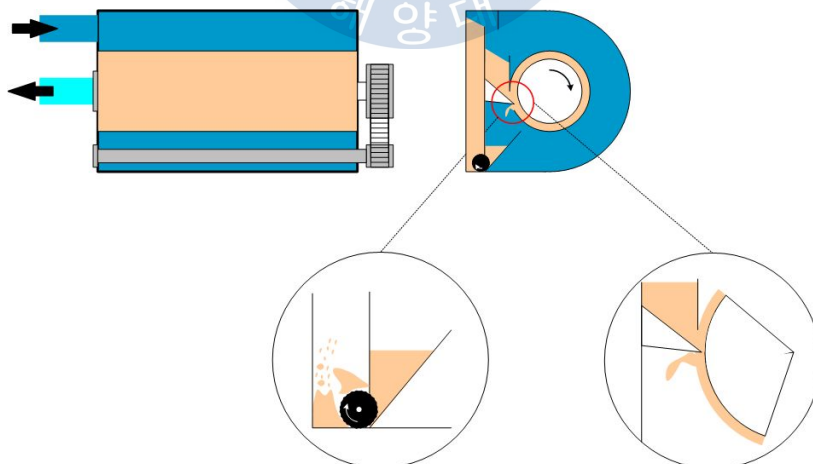


Fig. 2.4 Basic principle of media filter system

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

3.1.1 실험실 규모(Lab-scale) 실험장치

Fig. 3.1은 연속재생형 미디어 필터의 전체 시스템 계통도이며, 최적설계인자 구현을 위해 Fig. 3.2의 설계도면으로 Fig. 3.4의 Lab-scale 실험장치를 제작하였다. Lab-scale 실험 장치는 $1,000\text{mm} \times 270\text{mm} \times 1,100\text{mm}$ 크기의 미디어 필터 본체에 지름이 200mm 인 필터를 장착하여 $50\mu\text{m}$ 이상의 고형물을 여과할 수 있는 금속 재질의 여과망을 설치하고 펌프의 흡입시 진공이 걸려 미디어가 여과망에 흡착이 되도록 하였다. 또한 필터를 통과한 여과수를 저장하기 위하여 $1,000\text{mm} \times 700\text{mm} \times 900\text{mm}$ 크기의 아크릴 수조를 제작하였으며, 두 개의 수조 사이에는 지름이 50mm 인 유입관과 여과수의 재사용을 위한 토출관을 설치하였다.

일정한 양의 미디어 주입과 절삭을 위해 아크릴을 사용하여 Fig. 3.3과 같이 $410\text{mm} \times 166\text{mm} \times 580\text{mm}$ 크기의 장치를 제작하였다. 상자 내부에는 경사를 주어 미디어 주입 시 한 곳으로 모이게 하여 필터 표면에 일정하게 흡착이 되도록 하였으며, 미디어의 두께별 절삭을 위해 칼날을 부착시켜 미디어 필터가 구동모터에 의해 회전 시 원하는 두께만큼 절삭이 가능하도록 하였다. 또한 절삭되어 떨어지는 모래와 입경 변경을 위해 펌프의 전원을 끄게 될 시 흡착되어 있던 미디어는 아래로 떨어져 쌓이게 되고 이를 회수 할 수 있도록 미디어 필터 하부로 사각형의 아크릴 상자를 설치하였다. Table 3.1과 Table 3.2는 실험에 사용된 펌프와 모터

의 명세를 나타낸 것이다.

Table 3.1 Specifications of pump

Water mark	280ℓ/min
Power consumption	1500W
Induction pipe	50m ²
Minimum head	0.5m

Table 3.2 Specifications of motor

Type	TEFC
Frame	71M
KW	0.4
RPM	1685

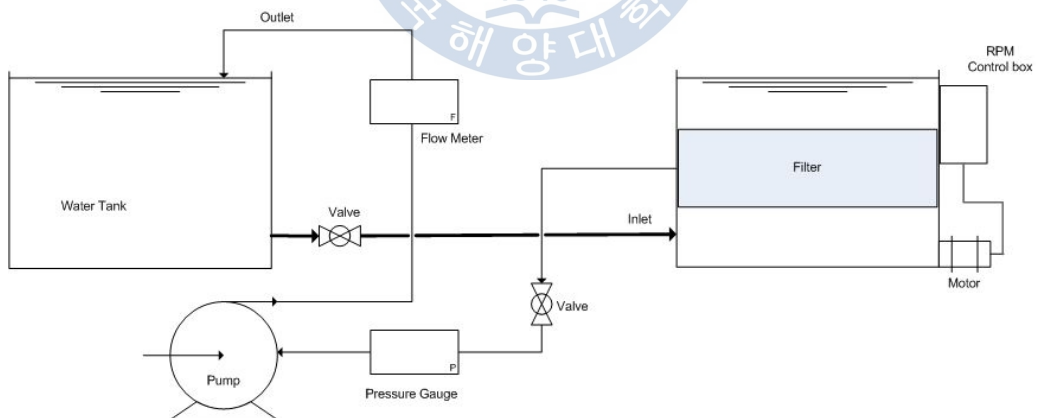


Fig. 3.1 Schematic diagram of Lab-scale media filter system

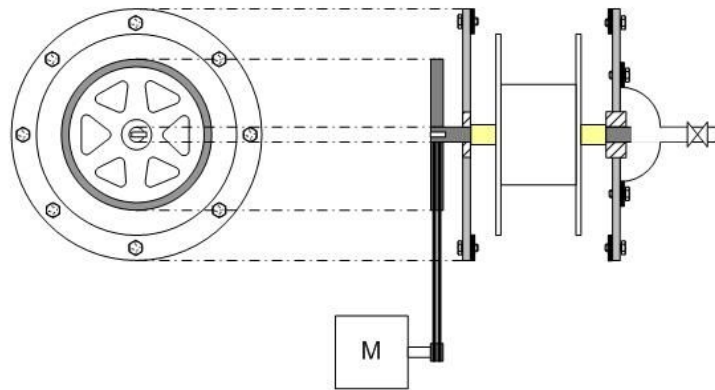


Fig. 3.2 Drawing of Lab-scale media filter

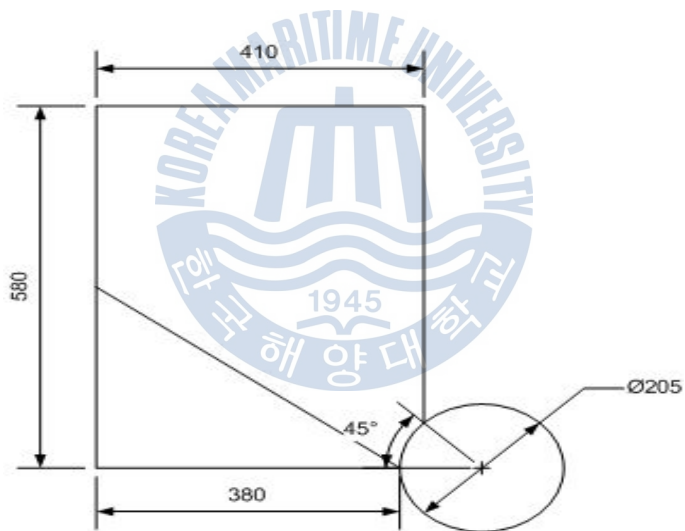


Fig. 3.3 Drawing of media inlet and cutting part



Fig. 3.4 Photograph of Lab-scale equipment

3.1.2 시작품(Pilot plant)

Lab-scale 실험을 통해 도출된 최적설계인자를 바탕으로 제작한 연속 재생형 미디어 필터 장치 시작품의 전체 시스템 계통도는 Fig. 3.5와 같으며, 장치의 사진은 Fig. 3.6에 나타내었다. Lab-scale 실험 장치에서 미디어 필터 본체는 공간이 협소하여 여과 후 잔존하는 부유 고형물질과 미디어의 회수가 힘든 문제점이 있었다. 이에 시작품에서는 1,000 mm × 800 mm × 1,100 mm 크기의 미디어 필터 본체를 제작하여 부유 고형물질과 미디어의 회수가 용이하도록 공간을 늘렸으며, 효율적인 장치운동을 위하여 미디어 주입부 및 절삭부를 견고하게 수정하고 구동모터의 위치를 조정하였다. 또한 Lab-scale 실험 장치에서는 미디어 필터 하부로 떨어지는 미디어를 수동으로 회수하였지만 시작품에서는 이를 자동으로 회수하여 미디어 주입부를 통해 필터 표면에 공급할 수 있도록 공기 공급 장치를 고안하여 미디어 필터 본체 내부에 설치하였다. 공기 공급 장치의 작동원리는 U자 형태의 좁은 관을 통해 단일 방향으로 압축공기를 강하게 주입하여 공기와 미디어가 함께 이동할 수 있도록 하였다. 이 외에 미디어 필터, 여과수 저장을 위한 아크릴 수조, 펌프 및 모터 등은 Lab-scale 장치와 동일하게 제작을 하여 적용하였다.

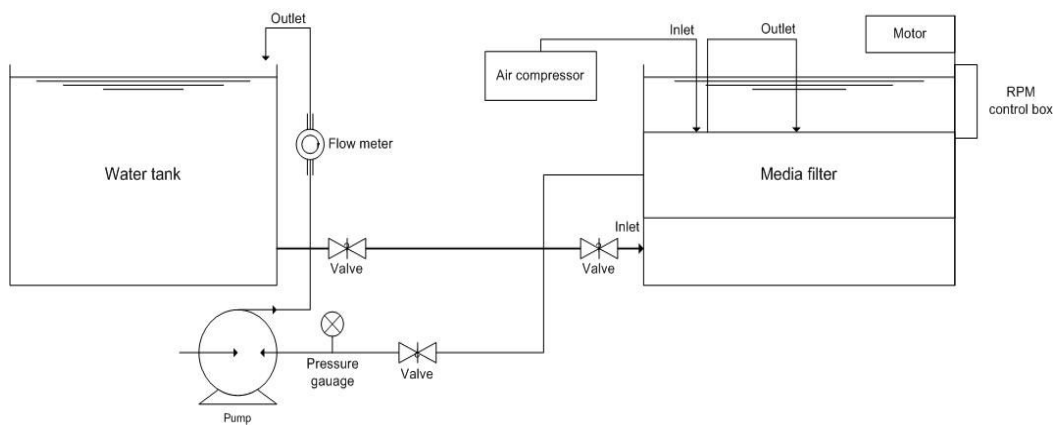


Fig. 3.5 Schematic diagram of Pilot plant media filter system



Fig. 3.6 Photograph of pilot plant equipment

3.2 시료 및 운전조건

3.2.1 미디어의 선정

연속재생형 미디어 필터 실험에 사용할 최적 미디어를 선정하기 위하여 모래, 규조토, 코크스, 안트라사이트 등의 소재를 대상으로 진공여과 실험을 한 후 세척하여 미디어 상태를 관찰한 결과 모래를 제외한 나머지 미디어들은 여과 중에 입자간의 충돌로 인하여 손상되거나, 미디어 자체가 유실되어 회수율이 낮은 반면 가격이 높아 대용량의 녹조제거용 미디어로서는 부적절하였다. 미디어의 여과성능은 약간 감소하더라도 회수율이나 미디어의 수면 및 구입단가 등을 고려하여 미세모래를 최적 미디어로 선정하였고, 모래를 이용한 미디어 필터의 최적 운전조건을 찾기 위하여 최대 $700\mu\text{m}$ 이상에서 최소 $100\mu\text{m}$ 이하의 모래를 입경별로 체 걸음 하여 각 입경에서의 진공여과실험을 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다.

3.2.2 진공여과시료의 제조

실험에 사용된 부유고형물을 함유한 진공여과시료는 현장에서 채취하여 고농도로 농축시킨 녹조 원수를 조류예보제의 농도 기준에 맞추어 $20\text{ mg}/\ell$ 로 희석하여 여과수를 제조하였다. 탁도 18 NTU, pH 7.50으로 일정하게 유지하여 실험 장치에 투입하는 방법을 채택하였다. 광학현미경 (Carl Zeiss Axiostar plus) 상에서 찍은 녹조 Fig. 3.7을 살펴보면 규조류, 남조류, 녹조류, 편모조류 등을 관찰 할 수 있었다.

Table 3.3 Algae regulation

	Chlorophyll - a (mg/m ³)	Blue-green algae (cell/ml)
Algae warning	15 ~ 25	500 ~ 5000
Algae alert	> 25	> 5000
Algae bloom alert	> 100	> 1,000,000 Occurs scum
All clear	< 5	–

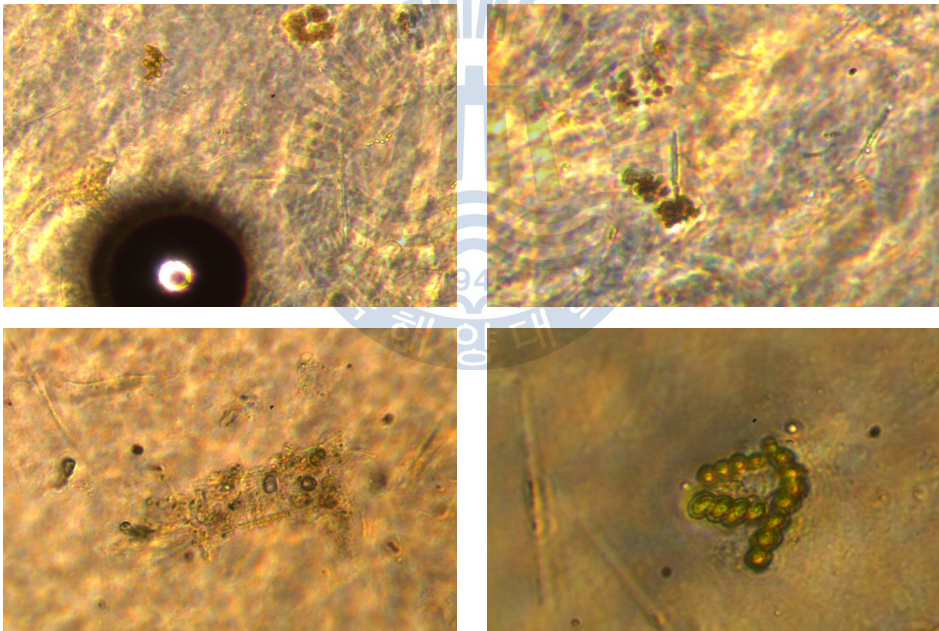


Fig. 3.7 Photomicrograph of green algae in influent

3.2.3 시험항목 및 측정방법

시험항목은 조류예보제에서 규제 기준으로 정하고 있는 Chlorophyll - a와 TSS 및 탁도 등을 분석하여 여과 전후의 녹조 제거효율을 관찰하였다. 측정방법은 Standard method와 수질공정시험법 등을 참조하여 Table 3.4와 같은 방법으로 분석하였다.

Table 3.4 Analytical method

Test item	Analytical method
Chlorophyll - a	Standard method 10200 (Lambda 25)
pH	Standard method 4500 (YSI 63)
TSS	Standard method 2540
Turbidity	Standard method 2130 (HACH 2100P)

(1) 매디아의 물리적 성상 측정

측정항목은 유효경(effective grain size), 최소경 및 최대경(minimum size and maximum size), 세척탁도(washing turbidity), 비중(specific gravity), 강열감량(ignition loss), 염산가용율(dissolved rate with HCL) 등으로 수도용 여과모래 시험방법(한국상하수도협회 규격 KWWAF100)에 의해 측정하였으며 실험방법은 다음과 같다. 세척 탁도는 풍건시료 30g을 증류수 300ml에 넣어 1분간 150회의 비율로 혼합한 후 3분간 정지하여 상등액의 탁도를 HACH사의 2100P 탁도계를 이용하여 측정하였다. 체거름은 건조시료(105 ~ 110℃, 3hr) 0.15 ~ 2mm범위의 체를 이용

하여 통과 중량을 측정하여 누진 %로 나타낸 입도누적곡선을 바탕으로 유효경, 균등계수, 최소경 및 최대경을 계산하였다. 비중은 건조시료 30g을 50ml비중병에 넣고 증류수로 채워 수욕 상에서 30분간 중탕한 후 상온으로 냉각시켜 측정하였다. 강열감량은 시료 10g을 도가니에 넣어 $925 \pm 25^{\circ}\text{C}$ 에서 30분간 가열한 후 상온으로 냉각시켜 측정하였다. 염산가용율은 건조시료 10g에 미리 $37 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 로 가온한 염산(1+1) 50ml를 가한 후, 배양기 속에서 1시간 정치시킨 후 측정하였다. 공극율은 증류수를 안지름 28mm 길이 750mm인 잭슨 탁도관의 절반을 채운 후 시료 150g을 넣고 관을 180° 3회 이상 회전시켜 그 부피의 평균값과 비중을 이용하여 측정하였다.

(2) 메디아의 용출 특성 측정

메디아를 장시간 이용할 경우 원수의 계속적 유입이나 세척의 반복에 따라 대상물질의 구조변화 또는 자체 용출물질에 의한 여과수의 지화학성 변화가 초래될 가능성이 높다.^[12] 이에 메디아에 대한 용출실험을 실시함으로써 원수의 지화학성 변화 및 여과처리 과정 중에 미칠 수 있는 영향을 알아보았다. 이 용출실험 방법은 메디아 40g과 증류수 200ml를 혼합하여 진탕 시켰으며, 1, 3, 5, 10, 15시간으로 반응시간을 달리하여 실험하였다. 용출 후 3,000rpm에서 30분간 원심 분리시켜 상등액의 성분 분석을 실시하였다. 상등액의 성분분석은 NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} 로 IC(709METALFREE, Switzerland)를 이용하여 분석하였다.

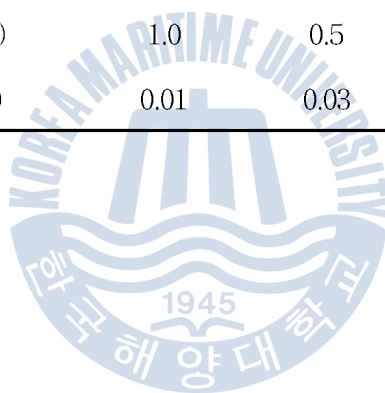
4. 실험결과 및 고찰

4.1 메디아의 물성 비교

수도용 여과모래 시험방법에 따른 메디아의 물리적 성상 측정결과를 Table 4.1에 나타내었다. 본 연구에서는 재료 구입의 용이성을 감안하여 메디아로써 모래를 사용하였으며, 메디아 자체의 뛰어난 여과능력으로 인해 수중에서 $0.5\mu\text{m}$ 보다 적은 입자를 걸러낼 수 있었다.^[13] 높은 공극률과 투수율을 가지고 있는 구조토는 비중이 낮아서 유기물의 탈착이 어렵고 여과시켰을 때 그 깨짐 현상이 심하며 염산 가용율이 낮은 문제점이 발생하였다. 특히 구조토는 세척 탁도가 다른 메디아에 비해 높게 나왔는데 이는 구조토의 불순물 함유율이 높은 것을 의미하며 초기 원수에 영향을 미칠 것으로 판단되었다. 안트라싸이트는 정수 및 폐수에서 수질의 개선을 목적으로 흔히 사용되는 물리적 처리의 여과재이다. 이것은 경도가 높아 입자의 마모손실이 아주 적고 수압에 의한 내구력이 커 장기사용에 의한 여과 속도의 저하가 일어나지 않으며, 비중이 가벼워 역세수량이 적고 시간이 짧은 장점이 있는데 강열감량에서 기준에 미치지 못하였으며 입자의 크기가 커 본 연구에서 원하고자 하는 입자크기까지 제거가 어려웠다. 석유에서 얻어진 코크스는 모래 다음으로 여과사의 품질기준에는 근접하였으나, 초기 코크스 성분 내의 기름성분이 유출되어 초기 원수의 탁도에 영향을 미칠 것이라 판단된다.

Table 4.1 Characteristics of media

ITEM	Sand	Diatomaceous earth	Anthracite	Coke
Dissolved rate with HCl(%)	3.1	66.3	1.6	3.3
Ignition loss (%)	1.3	0.7	0.8	14.16
Specific gravity	2.42	1.38	1.51	1.88
Washing turbidity(NTU)	1.2	12.7	1.5	2.1
GRIKE (%)	53	58	35	52
Effective grain size(10%)	0.1 mm	0.15 mm	1.0 mm	0.2 mm
Uniformity coefficient	2	1.33	1.3	4.25
Maximum size(mm)	1.0	0.5	1.95	2.0
Minimum size(mm)	0.01	0.03	0.01	0.01



4.2 메디아의 용출 특성 비교

메디아에 대한 용출실험을 실시함으로써 원수의 지화학적 변화 및 여과처리 과정 중에 미칠 수 있는 영향을 알아보았다. 반응 시간을 달리한 메디아별 상등액의 성분 분석 결과는 Fig. 4.1부터 Fig. 4.4에 나타내었다. 코크스는 용출이 시작된 초기 1시간 동안에 PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- 가 빠르게 용출되다가 점차 평형을 이루었다. 전체적인 용출농도는 Cl^- 과 NO_3^- 는 낮은 농도를 보였고, PO_4^{3-} 와 SO_4^{2-} 가 높은 농도를 보였는데 특히 PO_4^{3-} 의 농도가 최대 $20\text{mg}/\ell$ 로 가장 높은 농도를 보였다. 이는 코크스가 석탄이나 석유에서 생산되는 탄소를 주요 성분으로 하는 고체인 특성을 봤을 때, 석탄이나 석유에 포함된 인광석의 영향을 받았을 것으로 판단된다.

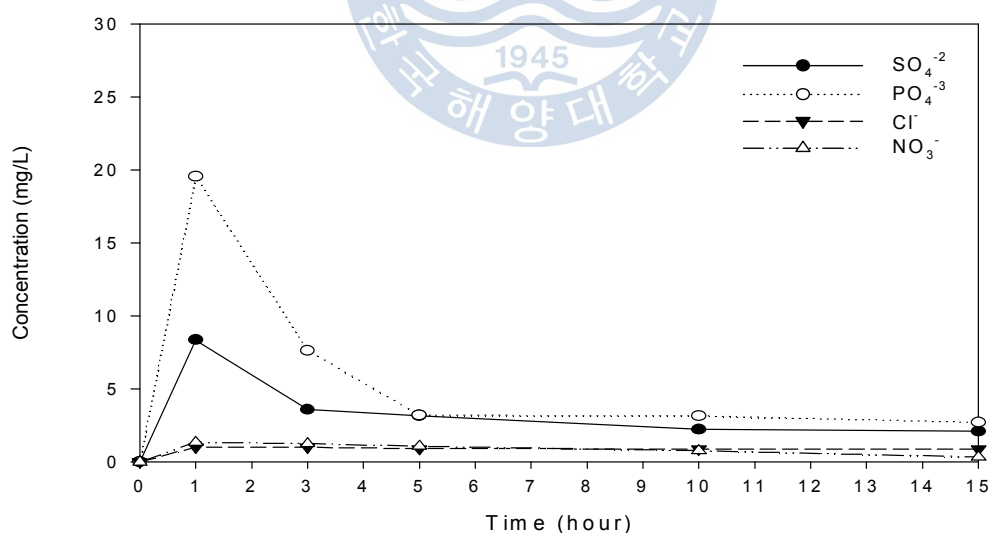


Fig. 4.1 Leaching characteristics of coke with time

안트라싸이트의 용출결과를 살펴보면 다른 메디아와 비교하였을 때 용출농도가 0 ~ 5mg/ℓ로 가장 낮은 농도를 나타내었다. PO_4^{-3} , SO_4^{-2} , NO_3^{-} 는 용출이 시작된 지 1시간 내에 빠르게 용출되다가 점차 평형을 이루었다. Cl^{-} 성분은 5시간 이후에 가장 높은 용출농도를 보이다가 점차 낮은 농도로 평형을 이루었다. 안트라싸이트 용출결과 SO_4^{-2} 가 특히 높은 농도를 보였다.

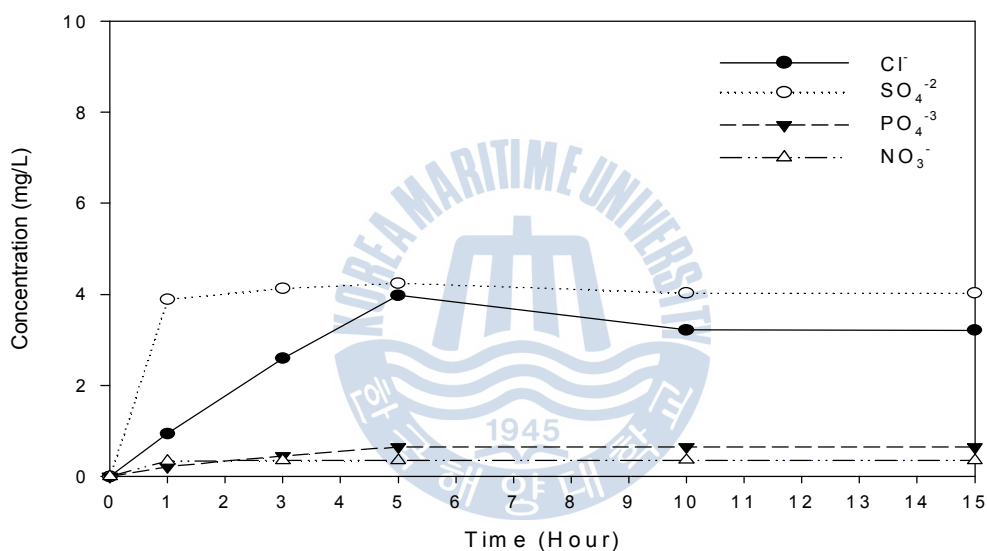


Fig. 4.2 Leaching characteristics of anthracite with time

모래의 경우 Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} 는 낮은 농도로 용출되었고 NO_3^- 성분이 $35\text{mg}/\ell$ 로 가장 높은 농도를 보이는 것으로 분석되었다. NO_3^- 성분을 제외한 다른 성분의 농도는 용출이 시작된 지 1시간 이후에는 점차 평형을 이루었으나 NO_3^- 성분은 시간에 따른 일정한 농도변화 패턴을 나타내지 않았다.

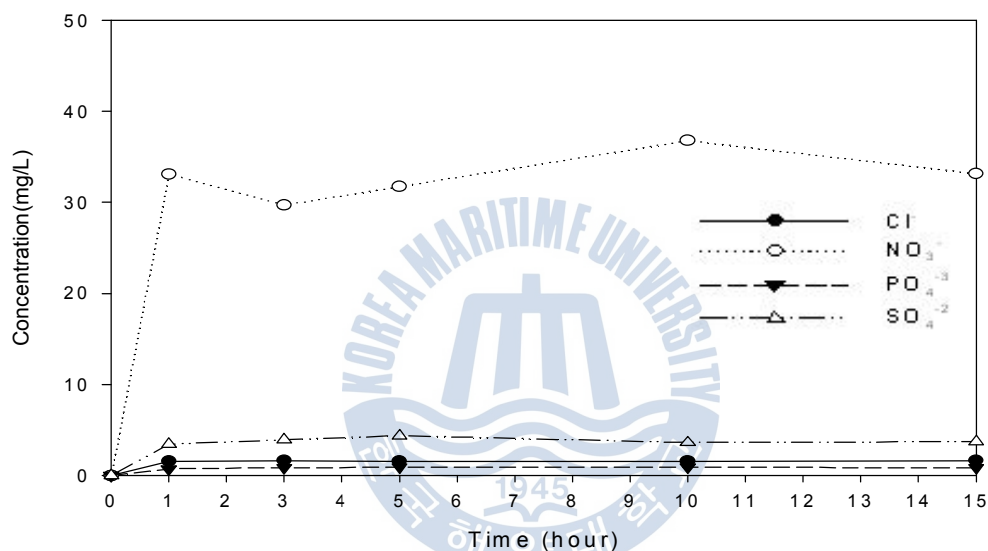


Fig. 4.3 Leaching characteristics of sand with time

규조토는 초기 Cl^- , NO_4^- , SO_4^{-2} , PO_4^{-3} , 성분이 빠르게 용출되었으며, 시간이 경과함에 따라 Cl^- 성분이 미량성분 중 가장 높은 용출농도를 보였다. 용출실험 결과 가장 낮은 농도를 보이는 메디아는 안트라싸이트로 나타났다.

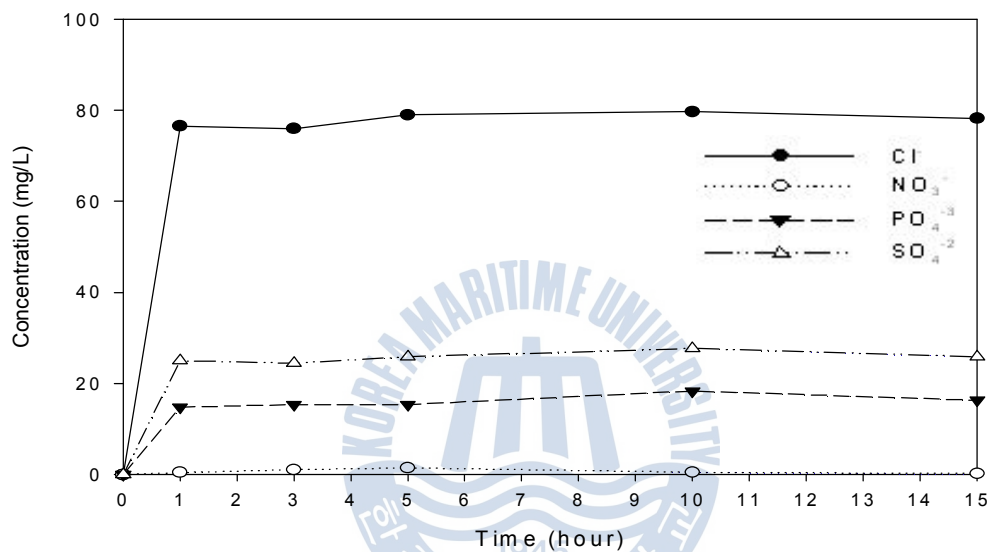


Fig. 4.4 Leaching characteristics of diatomaceous earth with time

4.3 미디어 필터의 여과 특성 분석

4.3.1 미디어 층의 입경별 깊이에 따른 압력 및 유량 변화

최적의 미디어 여과층을 구현하기 위한 기초실험으로 체 분리 한 입경 $45 \sim 90\mu\text{m}$, $90 \sim 150\mu\text{m}$, $150 \sim 200\mu\text{m}$ 크기의 모래를 이용하여 미디어 층의 두께를 0cm부터 10cm까지 변화시켜 가며 진공여과를 실시하고 각각의 압력과 유량을 측정하여 Fig. 4.5, Fig. 4.6 및 Fig. 4.7에 나타내었다. 실험결과 미디어 층의 두께가 $200\mu\text{m}$ 에서 0.9cm일 때, $150\mu\text{m}$ 에서 0.8cm일 때, $90\mu\text{m}$ 에서 0.7cm일 때 각각 연속여과의 임계점을 나타내고 있으며, 미디어 층의 막힘 현상이 전형적인 여과종말점과 일치함을 알 수 있다. 압력과 유량의 커브는 여재의 두께와 입경에 따른 일차함수로서 선형화한 지수함수를 기본으로 여과저항의 종류에 따라 복합적으로 변화하므로 미디어 필터의 상세한 운전인자는 여과대상에 따라 정밀추적 실험을 통하여 결정해야 됨을 알 수 있다. 최대 압력 값은 700mmHg, 유량 변화 값은 크기가 가장 작은 $90\mu\text{m}$ 에서 미디어 층의 두께가 10cm일 때 가장 낮은 값을 보여주고 있다.

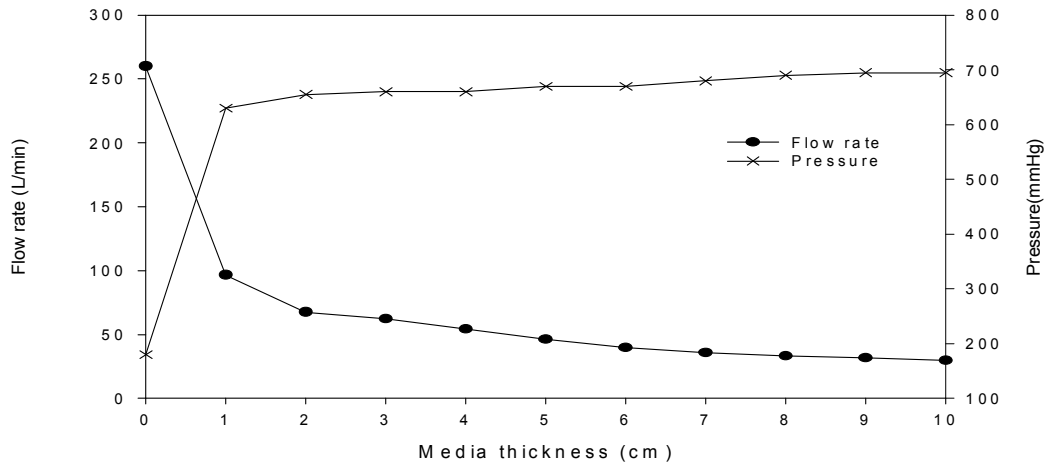


Fig. 4.5 Change of the media filter pressure and flow rate upon thickness of sand in Lab-scale (S_d , diameter of sand = $200\mu m$)

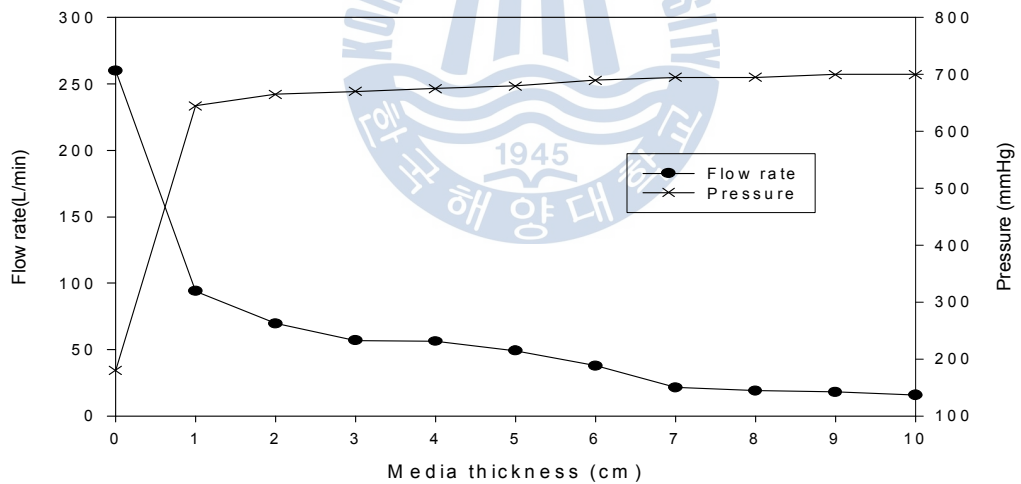


Fig. 4.6 Change of the media filter pressure and flow rate upon thickness of sand in Lab-scale ($S_d = 150\mu m$)

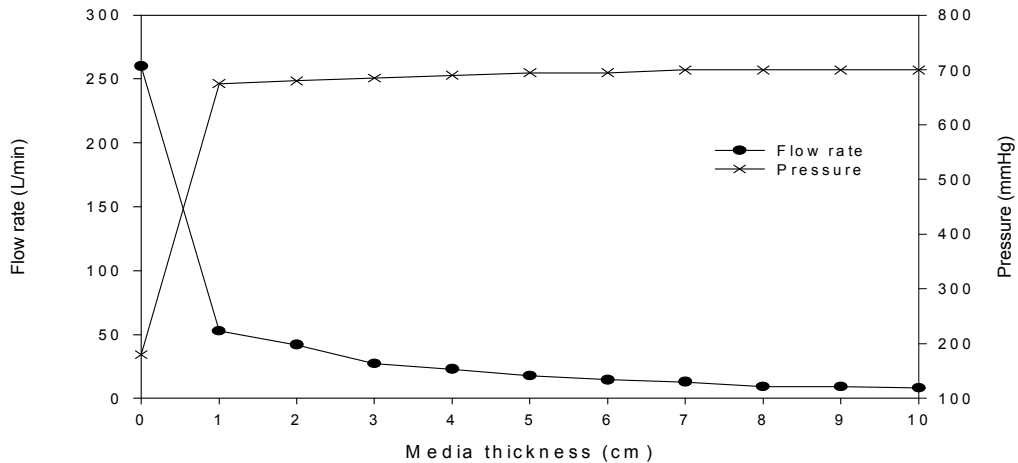


Fig. 4.7 Change of the media filter pressure and flow rate upon thickness of sand in Lab-scale ($S_d = 90\mu m$)

위의 기초 실험을 바탕으로 체 분리한 입경 $150\mu m$, $200\mu m$, $300\mu m$, $420\mu m$, $500\mu m$, $600\mu m$ 크기의 모래를 추가하여, 메디아 층의 두께를 0cm부터 20cm까지 균일하게 필터에 흡착시켜 진공여과를 실시하고 각각의 압력과 유량을 측정하여 Fig. 4.8, Fig. 4.9에 나타내었다. 필터의 표면에 각 두께 별로 모래를 흡착시킨 결과 $600\mu m$ 에서 $420\mu m$ 까지 유량변동의 폭이 다소 감소하였으나, $300\mu m$ 부터 $150\mu m$ 이하에서는 유량변동의 폭이 크게 감소하였다. 압력의 변화에서도 $600\mu m$ 에서 $420\mu m$ 까지는 다소 증가하거나 거의 변동이 없었지만, $300\mu m$ 에서 $150\mu m$ 이하에서는 큰 폭으로 증가하였으므로 유량변화와는 반비례의 값을 나타내었다.

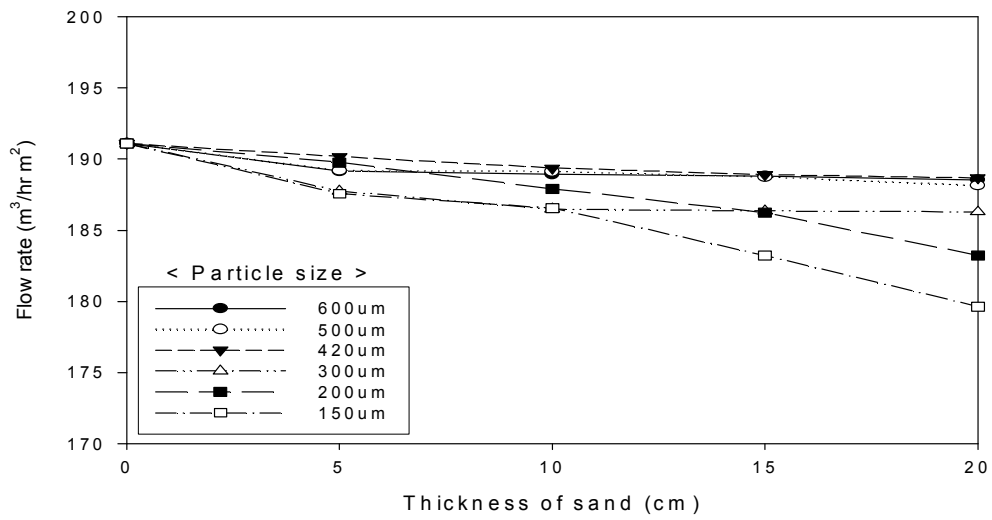


Fig. 4.8 Relationship between media filter flow rate and thickness of sand in Lab-scale

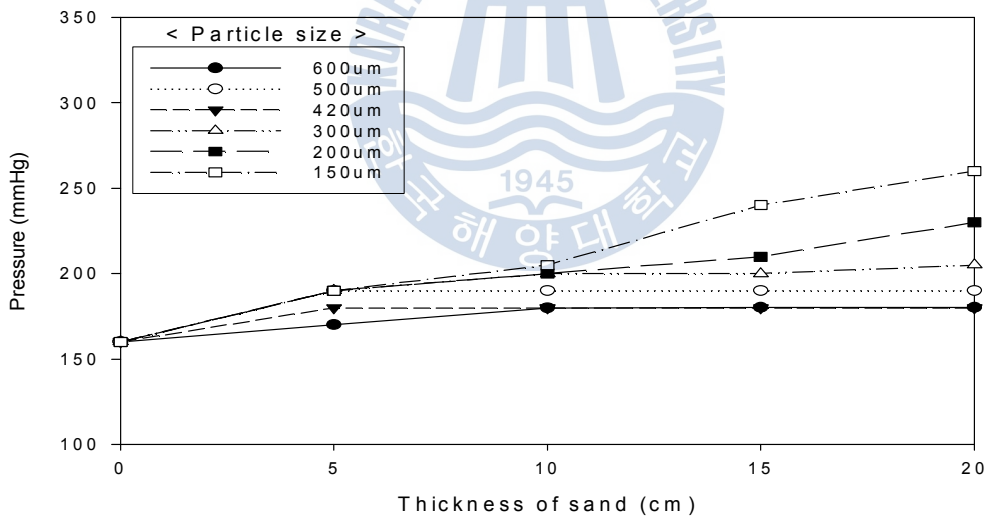


Fig. 4.9 Relationship between media filter pressure and thickness of sand in Lab-scale

4.3.2 미디어 층의 입경별 깊이애 따른 녹조 제거 특성

(1) 입경 $10\mu\text{m}$ 이상의 녹조 여과실험

최적설계인자 구현을 위해 녹조를 이용하여 제조한 입경 $10\mu\text{m}$ 이상의 여과물질을, 농도 $20\text{mg}/\ell$, 탁도 18 NTU로 수중에 풀어 미디어로 사용된 모래의 입경과 미디어 층의 두께별로 진공여과를 실시하였다. 진공여과 후의 여과수에 대하여 고형물의 농도를 분석하여 그 결과를 Fig. 4.10에 나타내었다. 실험결과 모래 입경이 $600\mu\text{m}$ 보다 작아질수록 두께는 두꺼워 질수록 더 높은 녹조 제거효율을 보였으며, 모든 조건에서 녹조의 제거효율이 90% 이상임을 알 수 있다. 여과물의 입경이 클수록 미디어 입경도 비례하여 큰 것이 여과효율 면에서 유리할 것이기 때문에 안정적으로 여과성능이 유지되는 범위 내에서 최대의 미디어 입경을 사용하도록 설계인자가 고려되어야 한다. 또한 미디어 층의 재생되는 시간, 즉 미디어 필터의 회전수와 오염 미디어 층의 깊이애 따른 절삭나이프의 위치 조절 등 복잡한 메커니즘의 운전인자를 효율적으로 조절할 수 있는 제어시스템이 필수적이다.

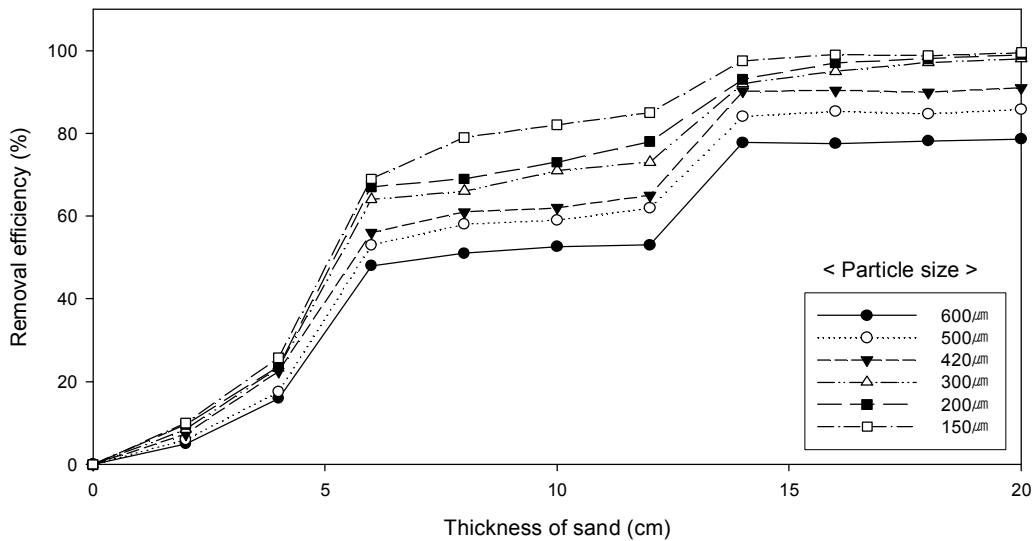


Fig. 4.10 Removal efficiency for green algae with different media size and thickness of sand in Lab-scale (G_d , diameter of green algae = above 10 μm)

(2) 입경 10 μm 이하의 녹조 여과실험

녹조입경 10 μm 이하, 농도 20mg/ℓ, 탁도 18 NTU의 진공여과시료를 제조하고 모래의 입경과 여과두께별로 진공여과를 실시한 결과 Fig. 4.11과 같이 메디아 입경 150 μm , 두께 1cm에서 약 99%의 SS제거효율을 보였다. 메디아 층의 두께가 10cm 이하일 때는 녹조입자가 메디아 층을 통과하는 pass-way가 발생하여 여과가 불가능하였고, 메디아 층의 두께가 12.5cm에서는 초기여과는 양호하였으나, 일정 시간이 경과 후 두께 10cm 실험에서와 마찬가지로 pass-way가 발생하여 여과가 불가능하게 되었다. 이 현상은 미세한 녹조입자가 메디아 여재사이로 스며들어 서서히

pass-way를 만들어 가기 때문인데, 원통 여과면이 1회전하여 미디어 여과층이 재생되는 시간동안 안정하게 여과성능이 지속되기 위해서는 녹조의 pass-way가 발생하는 시간과 미디어 필터의 회전속도 간의 적절한 조정이 필요하며 이에 관한 설계인자로는 녹조크기, 미디어 입경 및 두께, 여과속도 및 유량 그리고 케이크 및 분극여과저항의 함수로 판명된다. 본 연구의 결과에서 안정된 마진을 고려하여 입경 $10\mu\text{m}$ 이하 녹조여과의 경우 미디어 평균입경 $150\mu\text{m}$ 이하, 미디어 층 두께 15cm 이상, 진공압력 380mmHg 정도가 적절한 것으로 평가되었다.

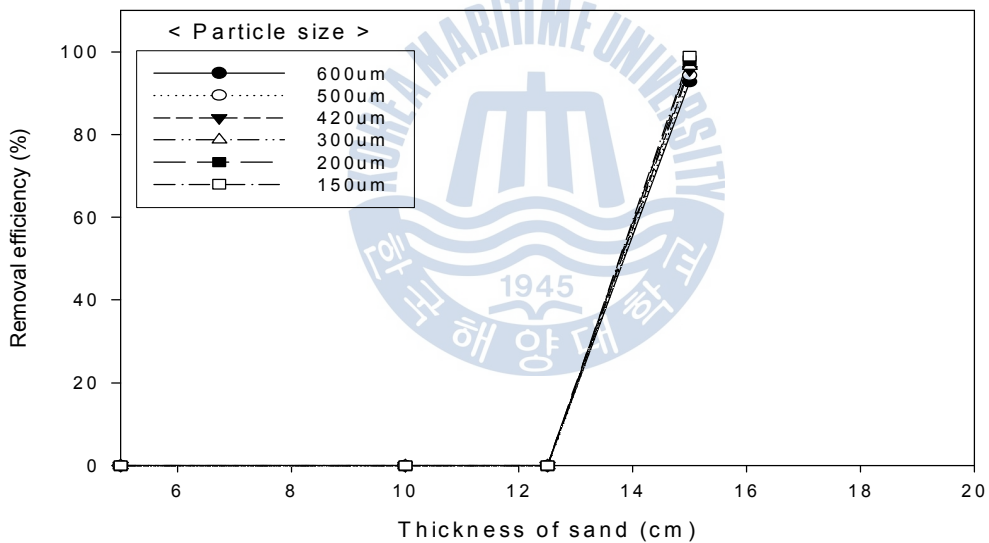


Fig. 4.11 Removal efficiency for green algae with different media size and thickness of sand in Lab-scale (G_d = below $10\mu\text{m}$)

4.4 시작품의 여과 특성 분석

4.4.1 매디아 층의 입경별 깊이에 따른 압력 및 유량 변화

Lab-scale 실험 결과를 바탕으로 녹조입경 $10\mu\text{m}$ 이하, 농도 $20\text{mg}/\ell$, 탁도 18 NTU의 진공여과시료를 수조에 가득채운 후 수중에서 체 분리한 $800\mu\text{m}$ 이하 $\sim 400\mu\text{m}$ 이상, $400\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$ 이상, $300\mu\text{m}$ 이하 크기의 모래를 이용하여 매디아 층 두께를 0cm에서 20cm로 균일하게 필터에 흡착시켜 실험을 실시하고 각각의 유량과 압력을 측정하여 Fig. 4.12와 Fig. 4.13에 나타내었다. 실험결과 Lab-scale 실험에서와 동일하게 모래 입경이 낮아질수록 유량변동 폭이 감소하였고, 압력변동 폭은 증가하였다. 이는 매디아 입자의 크기가 클수록 입자간의 공극이 크기 때문에 그 사이로 여과수의 이동이 많이 일어나게 된다. 이러한 경우에는 짧은 시간동안 많은 여과를 할 수 있겠지만, 공극이 큰 만큼 미세한 입자상 오염물질들은 걸러지지 않고 그대로 통과해버려 제거율은 감소하게 된다. 반면 입자의 크기가 작을수록 입자간의 공극이 작기 때문에 여과 시간이 다소 느려지며 유량이 감소하였지만 제거율은 증가하였다.

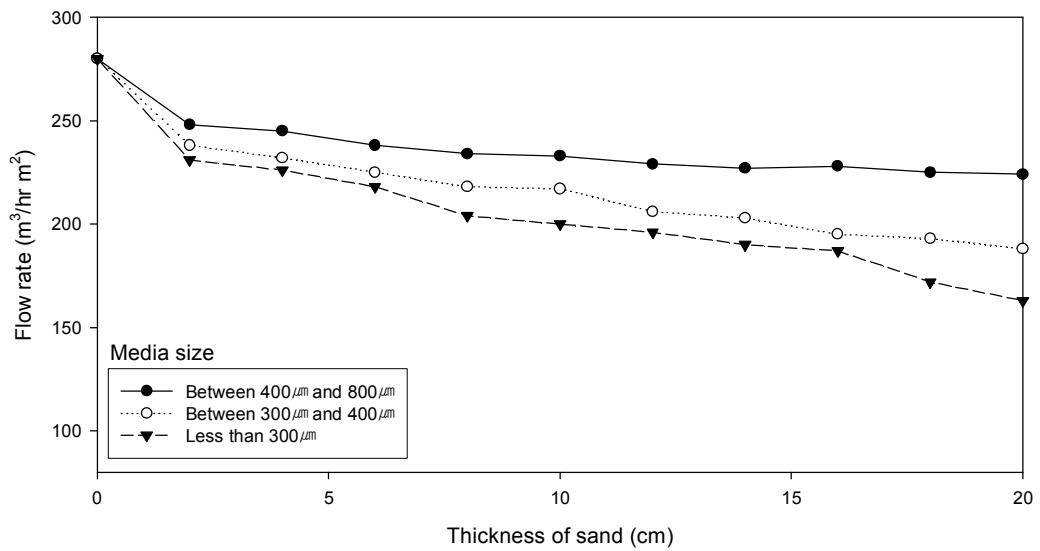


Fig. 4.12 Relationship between media filter flow rate and thickness of sand in Pilot plant

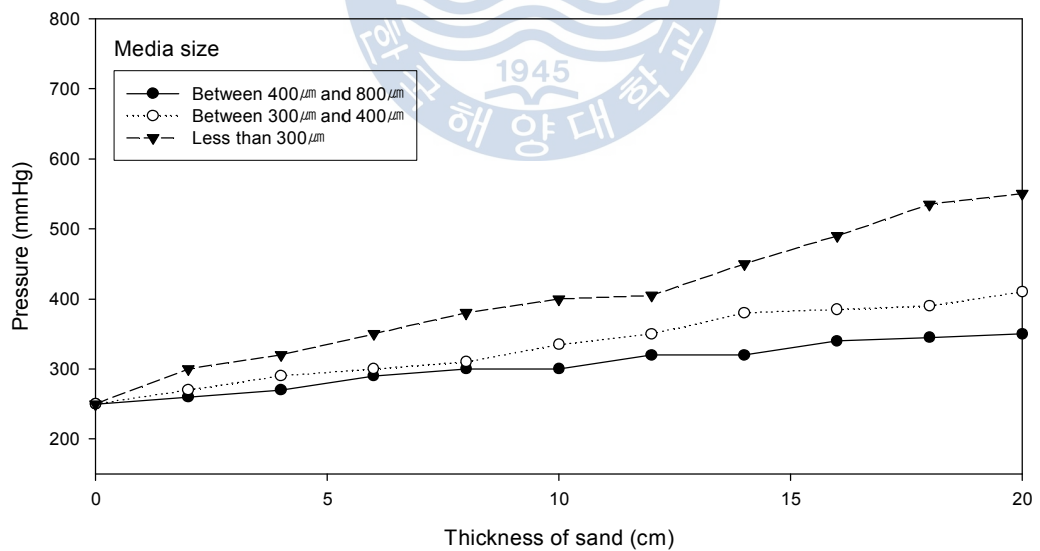


Fig. 4.13 Relationship between media filter pressure and thickness of sand in Pilot plant

4.4.2 매디아 층의 입경별 깊이에 따른 녹조제거 특성

녹조를 이용하여 제조한 입경 $10\mu\text{m}$ 이상의 여과물질을, 농도 $20\text{mg}/\ell$, 탁도 18 NTU로 수중에 풀어 모래층의 입경별 깊이에 따른 녹조여과를 실시하였다. 진공여과 후의 여과수에 대하여 chlorophyll - a 농도를 분석하여 그 결과를 Fig. 4.14에 나타내었다. Lab-scale 실험에서와 같이 모래 입경이 $800\mu\text{m}$ 보다 적어질수록 두께가 두꺼워 질수록 녹조제거효율이 증가하였으며, 대부분의 두께가 약 13 ~ 15cm에서 일정한 제거효율을 유지하였다. 특정 두께에서 더 이상 제거효율의 증가가 없는 것은 그 구간이 한계점이며 그 이상의 모래주입은 불필요하다고 판단된다.

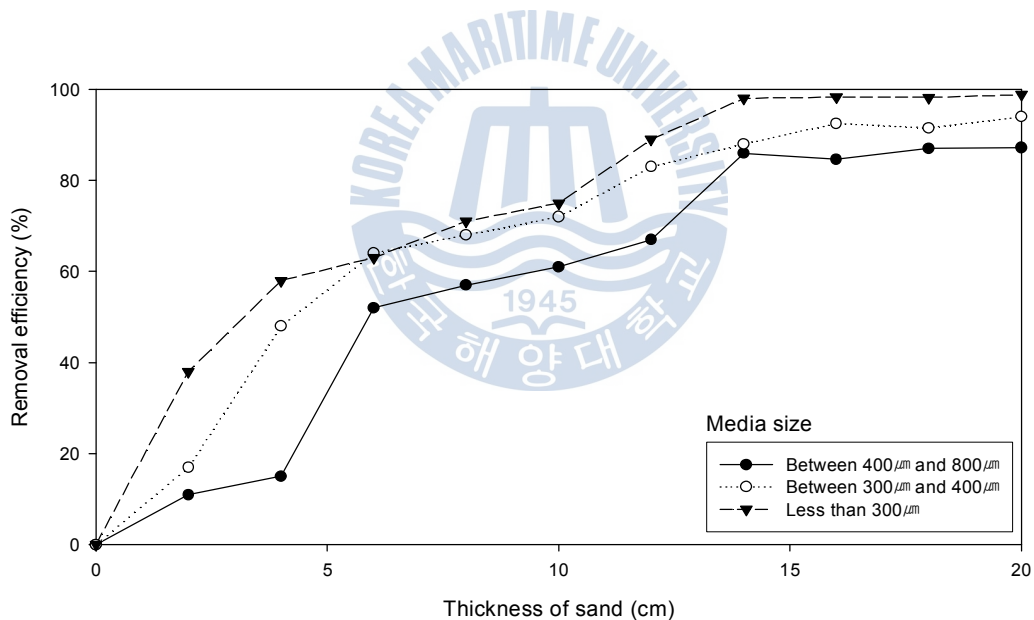


Fig. 4.14 Removal efficiency for green algae with different media size and thickness of sand in Pilot plant

4.4.3 미디어 재생속도에 따른 여과성능의 변화

필터에 모래를 흡착시킨 후 RPM의 변화에 따라 일정한 두께로 절삭하며 녹조 제거효율에 대하여 각 입경별로 실험을 수행하였다. 실험 결과 Fig. 4.15를 살펴보면 대체적으로 입경이 작을수록 RPM이 높을수록 높은 제거효율을 관찰할 수 있었다. $800\mu\text{m}$ 이하 $\sim 400\mu\text{m}$ 이상에서 40 RPM, $400\mu\text{m}$ 이하 $\sim 300\mu\text{m}$ 이상에서는 25 RPM, $300\mu\text{m}$ 이하에서는 약 15 RPM에서 가장 높은 녹조 제거효율을 보였다. 입경이 적을수록 입자간의 공극이 작기 때문에 모래 위로 흡착되어 침투되는 부유 고형물질의 속도가 느려져 낮은 RPM에서도 높은 제거효율을 보였지만 입경이 클수록 입자간의 공극이 크기에 낮은 RPM에서는 절삭되는 속도보다 부유 고형물질의 침투 속도가 빨라서 낮은 제거효율을 관찰할 수 있었다. 이를 해결하기 위해 입경이 클수록 RPM을 올려주면 높은 제거효율을 얻을 수 있겠지만 이는 경제적인 관점에서 적절하지 못하기에 적은 입경과 적정 RPM을 사용하는 것이 경제적이다 판단된다.

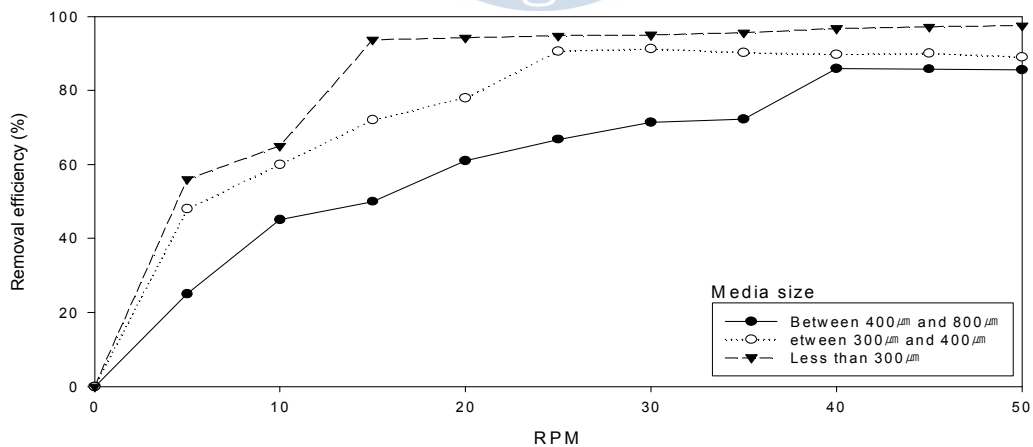


Fig. 4.15 Removal efficiency for green algae with different media regeneration speed in Pilot plant

4.4.4 응집제 첨가에 따른 여과성능의 변화

본 연구의 녹조 원수는 실험을 위해 chlorophyll - a 농도를 최저 기준인 20mg/ℓ에 맞추어 희석하여 사용하였다. 하지만 현장에서 녹조현상은 최저 20mg/ℓ에서 최고 4,000mg/ℓ까지 발생된다. 이에 따라 녹조의 농도가 고농도일 때 응집제 투여를 통해 높은 제거효율을 유지하고자 본 실험을 수행하였다. 응집제로는 액체로 된 $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ + 폴리머를 사용하였으며, 사전에 JAR TEST를 통해 적정 주입량을 결정하고 입경별 녹조제거 효율을 관찰하여 Fig. 4.16과 Fig. 4.17에 나타내었다. 실험 결과 메디아 층의 깊이가 6cm 이하 일 때, 각 입경별 응집제의 최적 주입량은 800 μ m 이하 ~ 400 μ m 이상에서 80mg/ℓ, 400 μ m 이하 ~ 300 μ m 이상에서는 60mg/ℓ, 300 μ m 이하에서는 40mg/ℓ임을 알 수 있었지만, 전체적인 제거효율의 변화는 큰 변동 없이 대략 94 ~ 99% 사이를 유지하였다. 메디아 층의 깊이가 15cm 이상 일 때는 응집제 주입량이 처음에는 큰 폭으로 증가하다가 40mg/ℓ 이상에서는 일정한 제거효율을 유지하였다. 이는 메디아 층의 깊이가 두꺼울수록 입경에 상관없이 최적의 응집제 주입량으로 높은 제거효율을 얻을 수 있으며, 그 이상의 응집제 주입은 불필요하다는 것을 알 수 있었다. 반대로 높은 입경의 메디아 사용시, 메디아 층의 깊이가 얇을수록 응집제 주입량이 많아지기 때문에 비경제적이라 판단된다. 따라서 최고의 녹조 제거효율을 위해 메디아 입경 300 μ m 이하, 응집제 주입농도 40mg/ℓ 정도를 투여하는 것이 가장 적절한 것으로 판단된다.

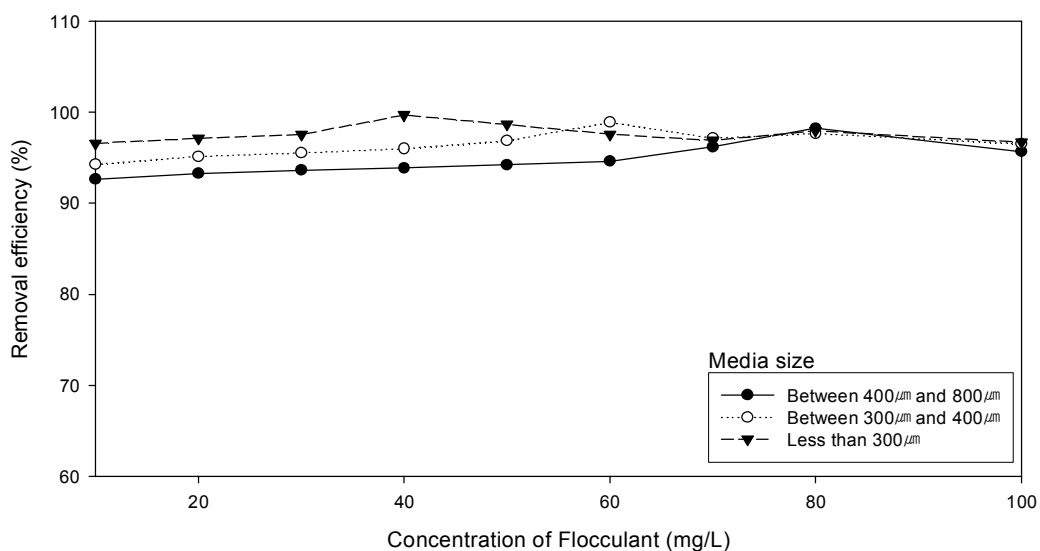


Fig. 4.16 Removal efficiency for green algae by adding flocculant in Pilot plant (S_t , thickness of sand = 6cm)

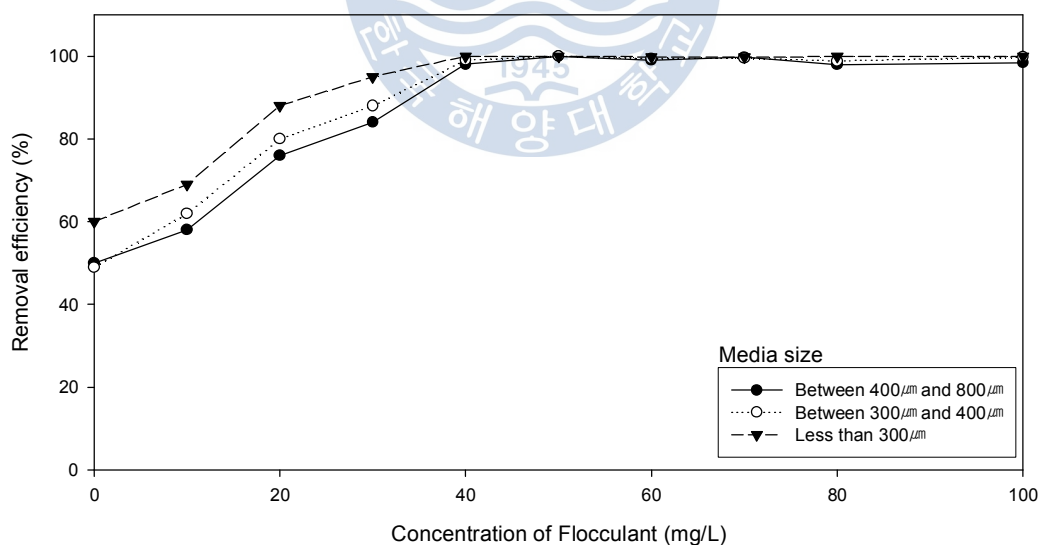


Fig. 4.17 Removal efficiency for green algae by adding flocculant in Pilot plant ($S_t = 15$ cm)

4.5 경제성 분석

본 연구에서 제작한 연속재생형 미디어 필터의 경제성을 분석하기 위하여 현재 보편적으로 상용화 되어 있는 미세섬유 여과기(Fiber filter)를 비교대상으로 선정하였다. 미세섬유 여과기와 미디어 필터를 현장에 설치하였을 경우 설치비와 하루 100m³의 처리용량으로 1년 및 5년 간 장치 운영에 소요되는 비용을 비교 계산하여 Table 4.2에 나타내었다. 미세섬유 여과기는 다공관 주위를 감싼 미세유연사 다발을 상부로 당겨 공극을 작게 해 여과한 뒤 이를 이완시켜 공극을 크게 한 뒤 압축공기와 가압수로 역세하는 방식으로 초정밀 여과기능의 카트리지 필터에 역세기능을 부여한 여과기이다.

경제성 평가 결과 본 연구의 미디어 필터 장치는 반영구적이며 유지비가 적게 드는 필터로서 장치가 콤팩트하고 필요 부품의 수가 적기 때문에 설치비는 미세섬유 여과기에 비해 더 낮게 산출되었다. 또한 1년간 장치 운영에 소요되는 비용은 미세섬유 여과기의 약 75%, 5년 간 장치 운영 시는 약 67%로 계산되어 현장에서 장기간 운영 시 미디어 필터의 경제성이 더 높을 것으로 판단된다.

Table 4.2 Comparison of installation and operation costs for fiber filter and media filter

Classification		Use 1 year	Use 5 year
Media filter	Installation costs	22,854,000 won	22,854,000 won
	Module replacement costs	552,000 won	552,000 won/yr×5 yr =2,760,000 won
	Electricity costs	669,240 won	669,240 won/yr×5 yr = 3,346,200 won
	Total installation costs	24,075,240 won	28,960,200 won
	Total volume	100 m ³ /d × 30 d/m × 12 mth/yr = 36,000 m ³	100 m ³ /d × 30 d/m × 12 m/yr × 5 yr = 180,000 m ³
	Unit treatment costs	668.8 won/m ³	160.89 won/m ³
Fiber filter	Installation costs	29,673,000 won	29,673,000 won
	Module replacement costs	1,384,000 won	1,384,000 won/yr × 5 yr = 6,920,000 won
	Electricity costs	1,275,120 won	1,275,120 won × 5 yr = 6,375,600 won
	Total installation costs	32,332,120 won	42,968,600 won
	Total volume	100m ³ /d × 30 d/m × 12 m/yr = 36,000 m ³	100m ³ /d × 30d/m × 12m/yr × 5 yr = 180,000 m ³
	Unit treatment costs	898.1 won/m ³	238.7 won/m ³

5. 결 론

녹조 제거를 위한 연속재생형 미디어 필터를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 연속재생형 미디어 필터의 최적 미디어는 모래가 최적이며, 미디어 층의 입경별 깊이에 따른 압력과 유량측정을 통해 입자크기가 $200\mu\text{m}$ 일 때 1cm, $150\mu\text{m}$ 일 때 0.8cm, $90\mu\text{m}$ 일 때 0.7cm 이하일 경우 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다.
2. 연속재생형 미디어 필터의 녹조제거 특성은 미세한 녹조를 여과함에 있어 모래입경 $150\mu\text{m}$, 두께 15cm, 진공압력 350mmHg로 판명되었다.
3. 연속재생형 미디어 필터의 최적성능실험 결과 모래입경 $300\mu\text{m}$ 이하, 최적 RPM 15, 응집제 주입량 $40\text{mg}/\ell$ 로 판명되었다.
4. 연속재생형 미디어 필터와 미세섬유 여과기에 대한 경제성 평가 결과 설치비와 1년간 장치운영에 소요되는 비용은 미세섬유 여과기의 약 75%, 5년 간 장치 운영 시는 약 67%로 계산되어 미디어 필터의 경제성이 더 높을 것으로 판단된다.

본 연구의 연속재생형 미디어 필터는 필터 엘리먼트의 교체가 필요 없어 경제적이고 미디어는 재생되어 반영구적으로 사용할 수 있으므로 기존의 마이크로필터에 비해 성능 면에서나 경제적인 면에서 강점을 가지고 있다. 따라서 미세한 부분과 재질이 보완되고 모든 공정이 자동으로 이루어지도록 투자를 하여 완벽한 시스템으로 시제품이 연구개발 된다면 현 시장에서 충분한 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 판단된다.



참고문헌

- [1] 한채호, 박우식, 김종현, 이영식, 노준혁, 김연규, 윤범상, 담수조류의 대량번식에 따른 피해를 최소화하기 위한 녹조제거기 개발, 한국해양환경 공학회지, Vol 3, No.1, pp. 62-69, (2000).
- [2] 조영일, 김광렬, 박돈희, 박영규, 박홍석, 이수구, 정연규, 최재완, 환경공학, 신광문화사, (1998).
- [3] 한국상하수도협회, 상수도시설기준, pp 352-353, 환경부, 서울, (2004).
- [4] 정철우, 송희중, 배상대, 원수의 물리화학적 특성에 따른 막분리 공정의 전처리 공정 적용성 평가, 대한환경공학회지, pp. 613-619, (2006).
- [5] 이정택, 안종호, 김자겸, 최근호, 급속여과공정에서의 효율적인 역세척방법 연구, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회, pp. 430-433, (1997).
- [6] 이정택, 정수처리를 위한 여과지의 역세척에 관한 연구, 대한상하수도학회지, 13호 3권, pp. 61-72, (1999).
- [7] 최승일, 이형숙, 역세척 방법에 따른 세척효과의 비교, 대한환경공학회지, 18권 12호, pp. 1521-1534, (1996).

- [8] 조영일, 김광력, 박돈희, 박영규, 박홍석, 이수구, 정연규, 최재완, 환경공학, 신광문화사, pp. 155-161, (1998).
- [9] 임성삼, 송영민, 김도형, 고분자 용액의 여과 특성, Korean Chem. eng. Res, Vol. 42, No.3, pp. 304-310, (2004).
- [10] 광종운, 물리·화학적 수처리 원리와 응용, 지샘, (1998).
- [11] 김백호, 황수옥, 식물플랑크톤과 수중환경 : 녹조발생메카니즘, EnvScience 10 : 9-16, (2001).
- [12] 고상모, 송민섭, 홍석정, 고 기능성 수질 정화 여과재로서의 장식질 모래 활용 연구, 한국광물학회지, 16권 4호, pp. 283-293, (2003).
- [13] 유재영, 규조토와 그 응용, 한국광물학회지, 13권 1호, pp. 39-50, (2000).
- [14] 박명환, 이석준, 윤병대, 오희목, 규산질다공체와 미생물응집체의 녹조제어 효과, 환경생물학회지, 19권 2호, pp. 129-135, (2001)
- [15] 한재호, 박우식, 김종현, 이영식, 노준혁, 김연규, 윤범상, 담수조류의 대량번식에 따른 피해를 최소화하기 위한 녹조제거기 개발, 한국해양환경공학회지, 3권 1호, pp. 62-69, (2000)

- [16] 신재기, 이혜숙, 정선아, 황순진, 친환경적 녹조제거용 특수선박 건조, 한국육수학회지, 42(3), pp. 404-406, (2009)
- [17] 정정조, 응집·침전 공정에서 무기고분자응집제를 이용한 미세조류의 제거, 대한환경공학회지, 30권 1호, pp. 85-89, (2008)
- [18] Ahmad, R., Amirtharajah, A., Al-Shawwa, A., hUCK, P., Effects of backwashing on biological filters. Filtration, 62-73, (1998).
- [19] A. Zouboulis, G. Traskas, P. Samaras , Comparison of single and dual media filtration in a full-scale drinking water treatment plant, Desalination 213 334-342, (2007).
- [20] Cleasby, J. L, et ai, Backwashing ingranular filter, J, of awwa, 69, 115~125, (1977).
- [21] C. Steicke, V. Jegayheesan, C. Zeng , Mechanical mode floating medium filters for recirculating systems in aquaculture for higher solids retention and lower freshwater usage, Bioresource Technology 98 3375-3383, (2007).

감사의 글

2003년 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 1학년으로 입학하여 철 없던 20대 초반을 넘기고 정신을 차려보니 2006년 건설환경공학부 2학년이 되어 있었습니다. 그 당시 아무것도 모르는 저를 환경공학이라는 학문을 좀 더 쉽게 접할 수 있도록 연구실의 문을 열어준 철홍이 형에게 우선 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 부족한 저를 받아주시고 5년이라는 긴 시간동안 항상 저에게 많은 것을 가르쳐주시고 이끌어주신 지도교수인 김인수 교수님께 진심으로 감사드립니다. 학업뿐만이 아니라 그 이외에 많은 것을 배우고 느낄 수 있도록 배려해주셔서 대학원 생활은 물론 앞으로의 사회생활에 있어 많은 도움이 될 수 있으리라 믿어 의심치 않습니다. 또한 저의 논문심사를 맡아주시고 소중한 충고와 조언을 해주신 송영채 교수님, 김억조 교수님, 힘든 대학원 생활을 잘 헤쳐 나갈 수 있도록 조언을 해주신 김명진 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

제가 이 자리에 있을 수 있도록 많은 가르침을 주신 환경기기 연구실의 상호 선배, 재동 선배, 국진 선배, 선정이 누나, 항상 잘 따라주고 실험을 하면서 물심양면으로 도와준 신영이, 기웅이, 아라, 태영이, 경철이 모두에게 고마움을 전합니다. 그리고 대학원 생활동안 든든한 힘이 되어준 동기 미정이, 켈빈, 난경이에게도 진심으로 고마움을 전합니다. 누구보다도 이번에 박사과정을 졸업하시는 이연승 누나, 누나 논문 쓰기도 바쁘신데 가까이에서 제 논문까지 신경써주시느라 정말 고생 많으셨고 감사합니다. 또한 본 학위 논문 연구를 할 수 있도록 실험 장치를 제작하여 주시고 많은 도움을 주신 (주)동신이엔텍의 김상민 사장님을 비롯한 관련된 모든 분들께 깊은 감사를 드립니다.

하늘에서도 끝까지 불효자인 저를 응원해주시는 아버지, 늘 제 곁에서 믿어주시고 응원해주신 어머니, 부족한 오빠지만 잘 따라주고 믿어주었던 사랑스런 동생 주영이와 항상 나를 이해해주고 배려해주고 믿고 기다려 주었던 미연이에게 이 논문을 바칩니다. 정말 고맙고 감사합니다. 앞으로 제가 받았던 은혜에 조금이나마 보답할 수 있도록 노력하는 삶을 살겠습니다. 마지막으로 지면으로 일일이 언급하지 못하였지만 그동안 저를 아껴주시고 격려해주신 모든 분들께 다시 한 번 진심으로 감사드립니다.

